

Regionális gravitációs anomáliák, izosztikus hatások Magyarországon¹

KISS JÁNOS²

A Bouguer-anomáliatérkép az adott terület földtani felépítéséről, a képződmények sűrűségétől függő integrált képet ad. Ez azt jelenti, hogy a felszíntől több, néhányszor tíz kilométeres mélységig minden képződmény együttes gravitációs hatása látszik a Bouguer-anomáliatérképen. Hosszú évtizedek óta a földtani kutatásban – nyersanyagkutatás (kőolaj, földgáz, kőszén vagy bauxit), termásvíz és geotermikus kutatás, valamint a földtani térképezés során – mint alaptérkép került felhasználásra a Bouguer-anomáliatérkép (alkalmazott geofizika). Ennek ellenére a gravitációs anomáliatérképnek van egy olyan összetevője, amellyel eddig nem nagyon foglalkoztunk, pedig hatással lehet a földtani értelmezésekre.

A földtani ismereteink és a földtani értelmezésre használt Bouguer-anomáliatérkép egymásnak ellentmondó medencealjzat-mélységet jeleznek az Alföld területén. A mélyfűrési földtani adatokat elfogadva, az ellentmondás okát a Bouguer-anomáliatérképben, illetve annak alkalmazásában kell keresni (pl. más hatást is látunk, nem csak a medencealjzat felszínének hatását).

A közép-európai Bouguer-anomáliatérképen jól látszik, hogy a Pannon-medence egy gravitációs maximum, ennek oka eddigi ismereteink alapján az, hogy a kéreg kivékonyodik, a köpeny felemelkedik. A Pannon-medencét három-négy oldalról magas hegyek, hegységek és gravitációs minimumok veszik körül. Az általános képletben a tömegvonzás a távolság négyzetével fordítottan arányos, ami azt jelenti, hogy minél közelebb vagyunk a ható objektumhoz, annál erősebb annak gravitációs hatása. Gond van tehát a Kárpátok, Alpok és Dinaridák felszín közeli, nagy sűrűségű képződményeivel (mészkö, dolomit, gránit stb.), mert nem látszik a hatásuk a közép-európai Bouguer-anomáliatérképen! Mi okozza ezt? A cikkben ezekre a kérdésekre – a gravitációs adatok hazai földtani értelmezésének javítása céljából – keresem a választ.

J. KISS: Regional gravity anomalies, isostatic effects in Hungary

The Bouguer anomaly map shows an integrated image of the geological structures of the studied area which depends on the density distribution of the rocks. It means that Bouguer anomaly map gives a summarized gravitational effect of all formations to be found from the surface until a depth of several tens of kilometres.

For several decades the Bouguer anomaly map has been used as an essential base map in geological prospecting for raw materials and thermal water, in geothermal exploration and geological mapping or in other words in applied geophysics. Despite this practice there is a special part of the gravity anomaly field what we have not dealt up to now with, though it may have an effect on geological interpretations.

Geological data and the Bouguer gravity anomaly map used for geologic interpretation (Fig. 1) indicate quite different depths in the case of the basement of Great Hungarian Plain (South-Eastern part of Hungary). Accepting the geological depth data got from boreholes we have an interpretational problem of gravity anomalies (perhaps the gravity anomalies are not caused by basement relief only).

The Bouguer anomaly map of Central Europe shows a gravity maximum above the Pannonian Basin, it is usually interpreted as a thinning of the crust and the up doming of the mantle. The Pannonian Basin is surrounded, from three-four sides, by high hills and mountain ranges and big gravity minimum anomalies. In the general formula, the attraction of gravity is inversely proportional to the square of distance, which means that the closer we are to the effective mass, the stronger the effect we observe. There is an interpretational problem of the Central European Bouguer anomaly map because we cannot see the effect of high density near surface geologic formations of Carpathians, Alps and Dinarides. What can be the reason of that? In this paper, I try to answer that question from the point of view of geologic interpretation of our home gravity anomalies.

Bevezetés

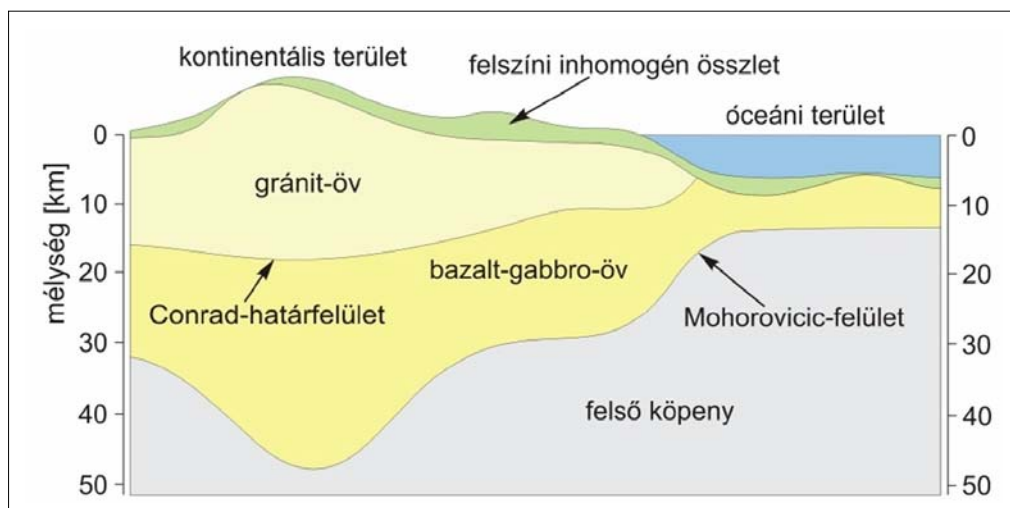
A Kárpát-medence gravitációs anomáliatérképét sokan felhasználták regionális tektonikai értelmezés és/vagy litoszféra kutatás céljából (ezek közül néhányan: SCHEFFER és KÁNTÁS 1949, SCHEFFER 1952, BALKAY 1959, RENNER és

STEGENA 1965, MESKÓ 1983, BIELIK 1988, SZABÓ 1989, BIELIK 1991, ÁDÁM és BIELIK 1998, SZAFIÁN 1999).

Cikkünkben azt vizsgáljuk, hogy milyen regionális hatással kell számolni a Kárpát-medencében, és hogy mennyiben használhatjuk fel a regionális hatásokat – az izosztikus korrekció alkalmazásával – a felső kéreg földtani kutatásának pontosításában. Érdekes kérdésként felmerül, hogy a domborzati adatok alapján kiszámolt izosztikus hatás és a mért Bouguer-értékek közötti különbség milyen mélybeli információt hordozhat a geodinamikai folyamatokkal kapcsolatban.

¹ Beérkezett: 2009. december 3., elfogadva: 2010. március 7.

² Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, 1145, Budapest, Kolumbusz u. 17–23., E-mail: kiss@elgi.hu



1. ábra. A földkéreg szerkezete a kontinensek és az óceánok alatt [VÖLGYESI 2002]

Fig. 1. Structural sketch of Earth's crust below continents and oceans [VÖLGYESI 2002]

Izosztáziaelmélet

Közismert a Föld izosztázia³- (vagy izosztatikus egyensúly-) elmélete, amelynek két legismertebb változata az AIRY- és a PRATT-féle izosztatikus modell.

PRATT (1855) a hegységeknél csökkent sűrűségű kőzetoszlopokat tételezett fel az egyensúly biztosítására.

AIRY (1855) azt feltételezte, hogy a tengerszint feletti domborzat egyfajta tükörképeként egy mély gyökérzónája is van a hegyeknek. A domborzat és a gyökérzóna azonos gravitációs hatásának köszönhető az izosztatikus egyensúly (mint az úszó test egyensúlya, pl. a jégtáblák a vízen).

Egyik modell sem tökéletes, de talán AIRY elképzelése van közelebb a valósághoz, persze kiegészítve azzal, hogy még a kristályos kőzetek sűrűsége is valamilyen mértékben növekedik a mélységgel.

Több izosztatikus modell is létezik még (pl. Hayford J. F., Browie W., Heiskanen W., Vening Meinesz F. A.), ezek azonban visszavezethetők az előző két modell valamelyikére, ezért ezekkel most részletesen nem foglalkozunk.

Az AIRY-féle elméletből az következik, hogy a magas hegyek alatt mély gyökérzónák nyúlnak bele a köpenybe (1. ábra) a kéregre jellemző kisebb sűrűséggel. A gyökérzónák mélységét a felszíni domborzatból vezethetjük le az alábbi képlet alapján:

$$d_m = (\sigma_t / (\sigma_m - \sigma_c)) h + d_s, \quad (1)$$

ahol

- d_m – kompenzációs mélység,
- d_s – a kéreg átlagos vastagsága,
- σ_t – Bouguer-féle korrekciós sűrűség (2670 kg/m³),
- σ_m – köpenysűrűség (3270 kg/m³),
- σ_c – kéregsűrűség (2670 kg/m³),
- h – domborzat.

Az (1) képletből látható, hogy a topográfiai magasság értéknek durván 4,5-szeresével [HEISKANEN, VENING MEI-

NESZ 1958; SIMPSON et al. 1985] kell számolni a gyökérzónák meghatározása során.

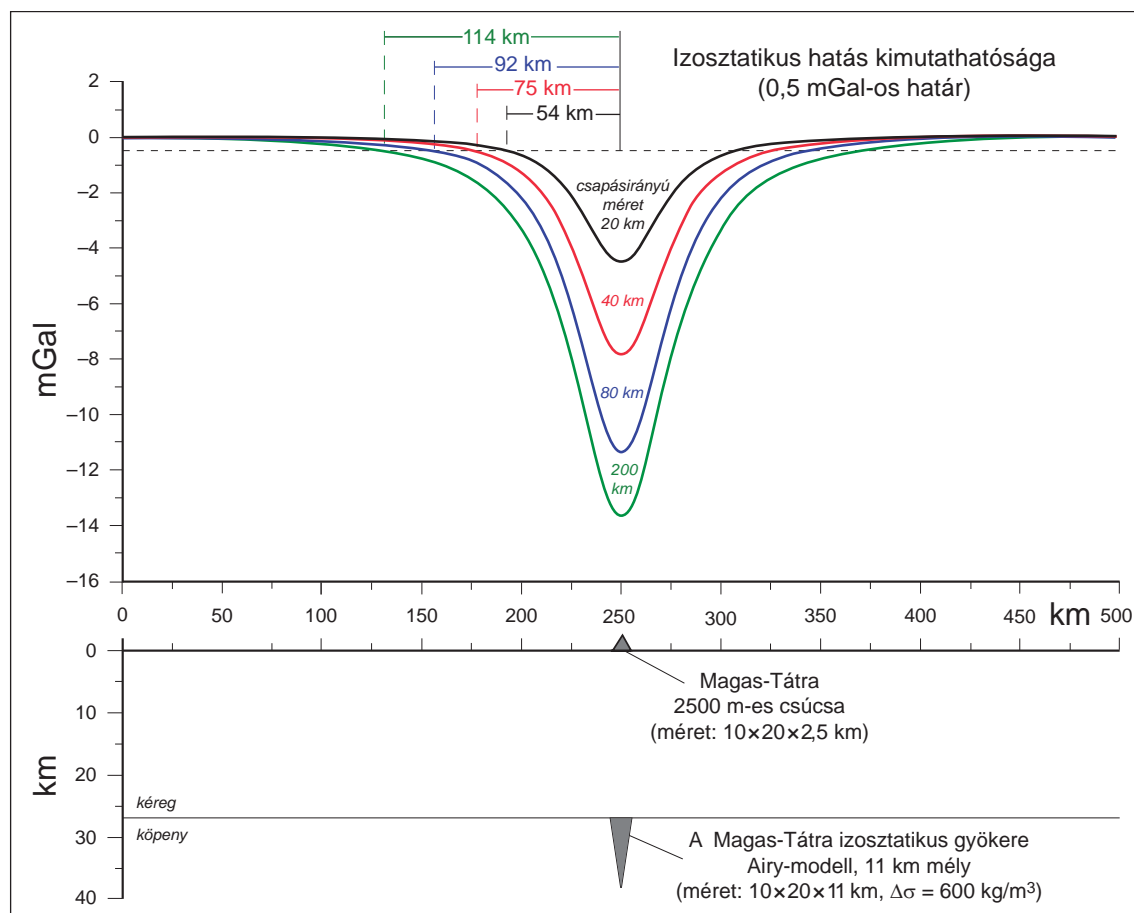
A magas hegyek tehát izosztatikus hatást okoznak, ami abban nyilvánul meg, hogy a hegyek felett – annak ellenére, hogy a nagy sűrűségű medencealjzat-képződmények már a felszíntől jelen vannak – jelentős Bouguer-anomáliaminimumok alakulnak ki. A mély üledékes medencék esetén – a földkéreg kivékonyodása és a köpeny megemelkedése miatt, esetleg a környező nagy minimumok miatt – Bouguer-anomáliamaximumot tapasztalunk.

A gravitációs anomália azért minimum a hegyek esetében, mert a magasság- (Faye-), Bouguer- és topo- (terrain-) korrekciókkal a domborzat tömegvonzási hatását eltávolítottuk, de a kéreg-köpeny határon jelentkező izosztatikus gyökérzónák hatását nem kompenzáltuk. A Bouguer-anomália számításakor elvégzett korrekciókkal a tengerszintre vonatkoztatjuk a mérési eredményeket. A tengerszint alatti tartományból is származnak azonban olyan hatások, amelyeket ki kellene kompenzálni, ahhoz, hogy csak a felső kéreg sűrűséginhomogenitásai jelenjenek meg a Bouguer-anomáliatérképen. Ilyen például az izosztatikus gyökérzónák, illetve a kiemelkedések hatása, amelyek regionális gravitációs anomáliákat (minimumokat, illetve maximumokat) okoznak. Az izosztatikus gyökérzónák és kiemelkedések hullámzó kéreg-köpeny határfelületként jelentkeznek (a Bouguer-anomáliatérképet egy mélységi hatással terhelik), amit a gravitációs adatfeldolgozás során sok esetben ki kellene szűrni!

A magyarországi domborzat

Magyarországon nincsenek nagy hegyek, a mai Magyarország területe egy vízgyűjtő medence. Milyen hatása lehet itt az izosztáziának? – gondolhatnánk. Magyarországon a hegyek mérete miatt nem feltétlenül kellene izosztatikus korrekciót alkalmazni, de a környezetünk izosztatikus hatása – csökkent Bouguer-értékek formájában – megjelenik az ország területén is. Körülöttünk mindenfelé magas hegyek vannak, Ny-ról az Alpok, É-ről és K-ról a Kárpátok, D-ről a Dinári-hegység és az Erdélyi Érchegység magas csúcsai övezik az országot. Minden hegy alatt az izosztázia alapján

³ A görög „ίσος” (iszosz: egyenlő) és „στάσις” (sztászisz: megállás, beállás) szavakból származik, azaz magyarul: egyensúly.



2. ábra. Egy Magas-Tátra magasságú hegy izosztikus hatása különböző csapásirányú (az ábra síkjára merőleges) méretek esetén (fekete szín mutatja a Tátra valós méretének hatását)

Fig. 2. The isostatic effect in gravity of a mountain like High Tatra (the color lines show the gravity effect at different sizes in strike direction, the black line shows the effect of Tatra's real size)

hatalmas gyökérzónák vannak, amelyek negatív Bouguer-anomáliák formájában jelentkeznek és körbeveszik Magyarországot. Ennek megfelelően a Kárpát-medence az európai Bouguer-anomáliatérképen maximumként jelentkezik, amelyet a környező hegyek negatív izosztikus anomáliái vesznek körül (és részben okozhatnak). Az ország széleinél erősebben, a közepén gyengébben érződik a gyökérzónák hatása, aminek köszönhetően az ország közepe felé haladva egy relatív maximumot tapasztalunk – amelyet csak a magyarországi gravitációs adatokból kiindulva – az ismert felszín közeli földtani felépítéssel, nem tudunk megmagyarázni (a hatás eredete nagyrészt az országhatáron kívül van).

A Kárpát-medencében a kéreg vastagsága 20–30 km között van. A medencét körülveszi az Alpok–Kárpátok–Dinaridák hegykoszorúja, amelyek alatt a gravitáció alapján izosztikus gyökérzónák vannak, és a kontinentális kéreg 40–50 km körülire vastagodik ki. Nagy kérdés, hogy a Moho szintjén milyen mozgás volt? A medencében emelkedett-e fel a köpeny, vagy a környezetében, a hegyek alatt az izosztikus gyökerek miatt mélyült el a kéreg–köpeny határfelület – aminek a következménye a relatív köpenykiemelkedés a medence területén?

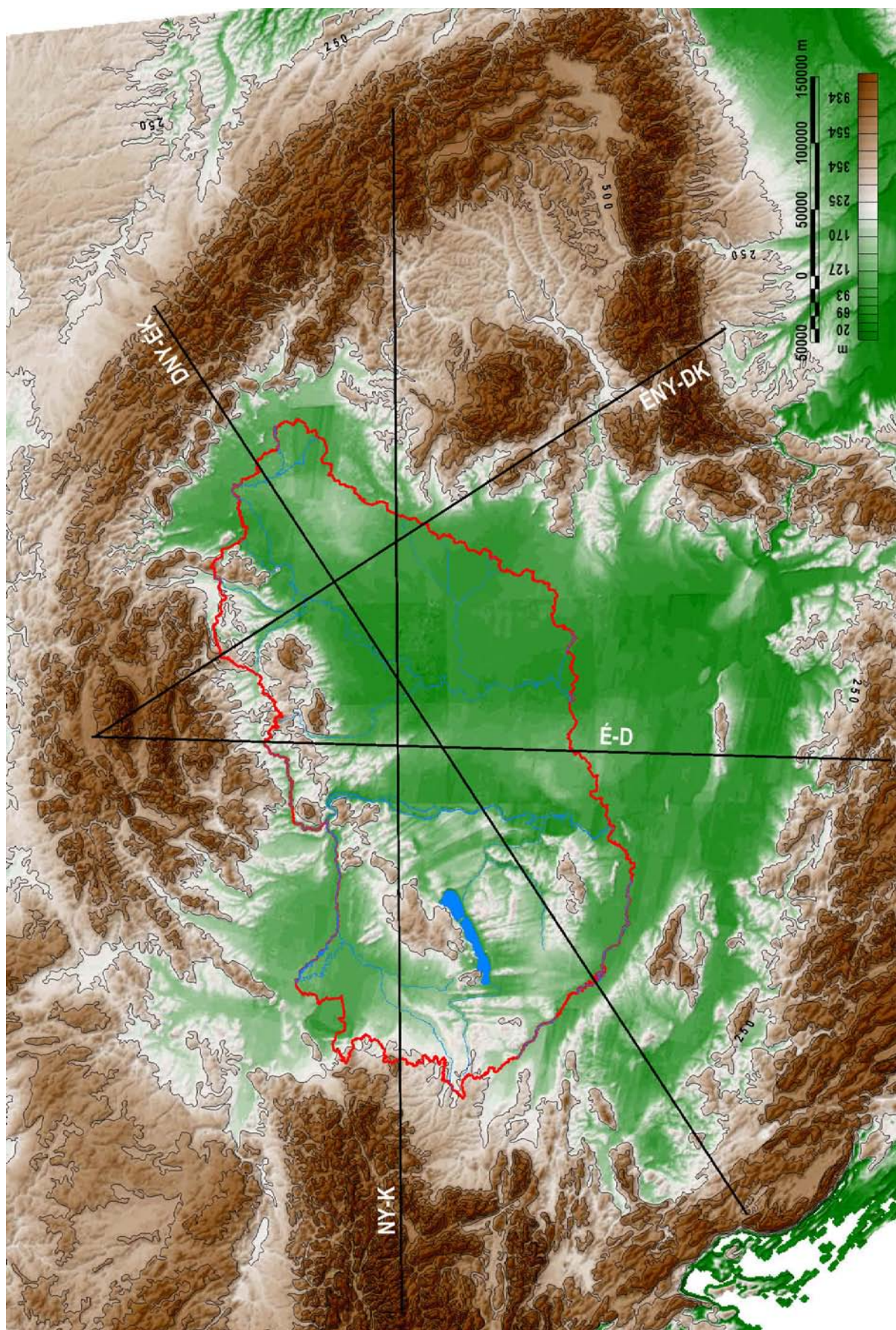
A környező országokhoz képest – ahol a mezozoós, paleozoós alaphegység már a felszíntől jelen van – Magyarországon jelentős mélységű üledékes medence van, feltöltve

fiatal harmad- és negyedidőszaki konszolidálatlan (azaz kis sűrűségű) laza üledékekkel. Ebből adódóan, ha az ismert felszín közeli összletekből indulunk ki, akkor gravitációs minimumnak kellene lennie a Kárpát-medencében és gravitációs maximumnak a környező, idősebb kőzetekből álló hegykoszorú területén.

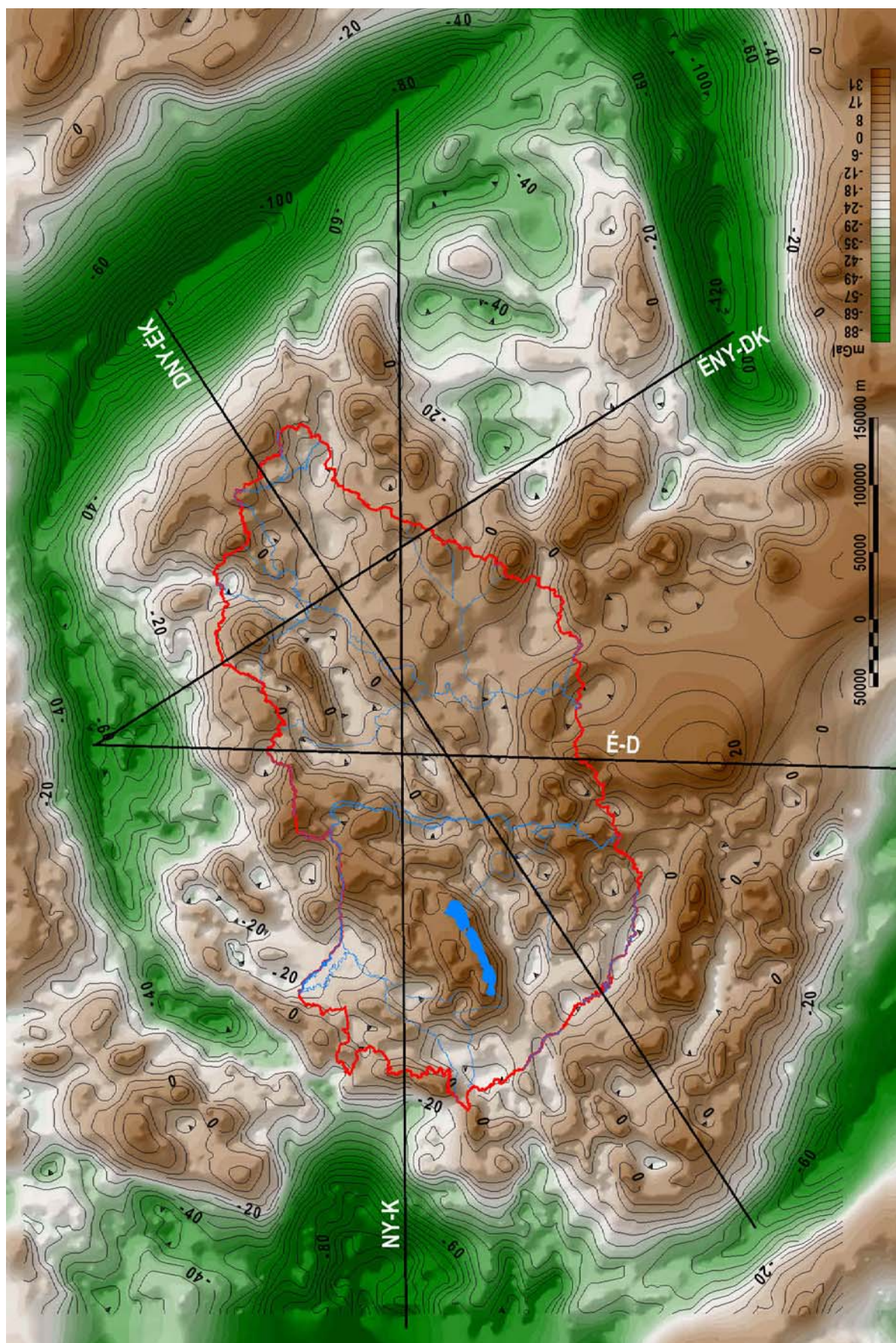
Az izosztázia hatásának mértéke

Az izosztikus hatások a tankönyvekből (pl. FACSINAY 1952, MESKÓ 1989, VÖLGYESI 2002 stb.) ismertek, de az izosztikus korrekciót a gyakorlatban nem alkalmazzák a Bouguer-anomáliatérkép pontosítására még a környező országokban sem, pedig a környező magas hegységek jelenléte (pl. Szlovákiában a Kárpátok, Ausztriában az Alpok) ezt erősen indokolná. Lokális földtani problémák megoldása során ez a pozitív vagy negatív regionális hatás hibás gravitációs értelmezéshez fog vezetni. Egészen más a helyzet a litoszférakutatáskor, ahol éppen ennek a regionális hatásnak a vizsgálatával foglalkoznak. Ezt azonban csak az európai szintű programok és adatrendszerek esetén lehet megtenni az anomália térfrekvenciájából adódóan.

A környező országokban nincsenek olyan jelentős vastagságú üledékes medencék, mint a Pannon-medence, ezért nem okoz értelmezési problémát a korrekció hiánya

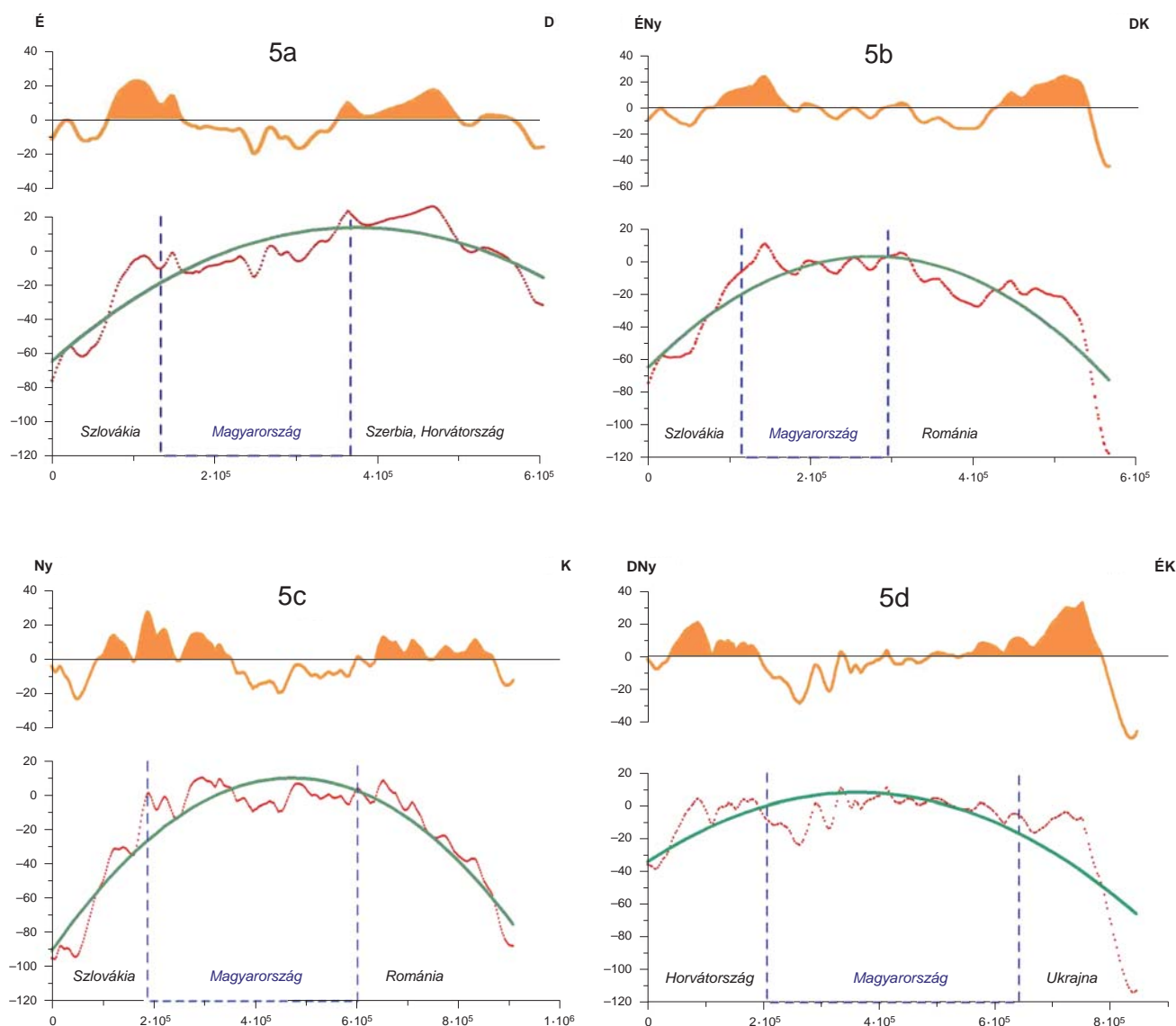


3. ábra. A Kárpát-medence domborzata a környező hegyekkel és a mintaszelvények helye
 Fig. 3. Topography of the Carpathian basin with the surrounding mountains and the location of the sample profiles



4. ábra. A mintaszelvények helyzete a négy fő irányban a közép-európai Bouguer-anomáliatérképen

Fig. 4. Location of the sample profiles in the four main directions on the Central European Bouguer anomaly map



5. ábra. Bouguer-anomália (piros), regionális hatás (zöld) és maradékanomália (narancs) az É–D-i (5a), az ÉNy–DK-i (5b), a Ny–K-i (5c) és a DNy–ÉK-i (5d) szelvény mentén

Fig. 5. Bouguer anomaly (red), regional effect (green), local effect (orange) along the profiles N–S (5a), NW–SE (5b), W–E (5c) and SW–NE (5d)

(a litoszférakutatás során a kutatott mélységeket hagyományos földtani eszközökkel nem lehet ellenőrizni). A sekélyebb kutatások esetén, a felső kéreg sűrűség inhomogenitásainak a pontos kimutatásához viszont el kell tüntetni a mélybeli (adott esetben köpenybeli) inhomogenitások torzító hatását.

Ismereteink alapján ezt a korrekciót elsősorban az Amerikai Geológiai Szolgálat [SIMPSON et al. 1983, 1985] és a Kanadai Geológiai Szolgálat (GSC 2006) alkalmazta nagy regionális gravitációs felméréseknél, a Bouguer-anomáliák földtani értelmezése során, nyilvánvalóan azért, hogy a nagy mélységek regionális hatásaitól megszabaduljanak és egy, a sekélyföldtani problémák megoldására jobban használható Bouguer-anomáliatérképet kapjanak. Az izosztatikus korrekció alkalmazása megjelenik a litoszférakutató szelvényekkel (CEL, ALP vonalak) kapcsolatos feldolgozásokban [BEHM et al. 2007], de alkalmazása nem általános.

Az izosztatikus hatás nagyságrendjének megbecslése céljából 2,5 dimenziós⁴ modellezést végeztünk, amelyhez WEBRING (1985) algoritmusát használtuk. A modellezés segítségével meghatároztuk, hogy pl. egy Magas-Tátra nagyságú hegy milyen izosztatikus hatást okoz (2. ábra), s hogy ennek a hatása a hegytől távolodva meddig érezhető?

Az ábráról látható, hogy a Magas-Tátra izosztatikus hatása a hegy gerincétől 54 km távolságra még 0,5 mGal mértékű. A csapásirányú, rajzra merőleges méreteket növelve (a 10 km-es szelvény menti vastagságot megőrizve), 200 km-es méret esetén ez a távolság már 114 km. A Kárpátok hegyvonulata ennél nyilván sokkal szélesebb, és sokkal hosszabban nyomon követhető a tengelye mentén csapásirányban,

⁴ A szelvényre (rajzra) merőleges, csapásirányban nem végtelen, hanem szimmetrikusan véges (adott esetben 20, 40, 80, 200 km) kiterjedésű test alkalmazása.

ennek megfelelően az izosztatikus hatás is sokkal nagyobb mértékű lehet.

A Kárpátoknak az ívre merőleges mérete (vastagsága) hegylábtól-hegylábig 100–150 km között változik (Erdélyt nem számítva). Az ív hossza 1200 km körüli és körbeveszi a Pannon-medencét, a hegycsúcsok 1000–1500 m-esek, így az izosztatikus hatás az oldalhatások, és a nagy méret miatt jóval nagyobb lehet, mint a szigethegységnek számító Magas-Tátra hatása. A Dinaridák esetében ez az ívre merőleges vastagság 100–250 km között van, az Alpok méretére jellemző, hogy csak elkezdődik a határon, de a vége nem látszik, mert csapásirányban van Magyarországhoz képest.

Magyarországot Ny-ról, ÉNy-ról, É-ről és ÉK-ról közvetlenül körbeveszik a magas hegyláncok (3. ábra), amelyektől 50–100 km a távolság. DK-ról, Erdélyből is izosztatikus hatással kell számolni az Erdélyi Érc-hegység (Apuseni-hegység) miatt.

Izosztatikus hatások Közép-Európa Bouguer-anomáliatérképén

A 4. ábra Közép-Európa Bouguer-anomáliatérképét mutatja. A térkép nem egyforma pontsűrűségű adatrendszerből készült, így például Szerbia esetében sokkal ritkább hálózattal kellett a 8 km-es szabályos rács távolságú Bouguer-anomáliatérképet elkészíteni, ami látszik is a térkép spektrális jellegéből.

A közép-európai Bouguer-anomália kiszámításakor – nemzetközi együttműködésben – az IGSN71 európai vonatkoztatási rendszert, WGS84 ellipszoidot és 2670 kg/m^3 korrekciós sűrűséget⁵ alkalmaztuk [MERÉNYI 2009].

A térképen néhány főirányban (3. ábra és 4. ábra) kiválogattuk a Bouguer-anomáliaértékeket. Ha van izosztatikus hatás, az a Bouguer-anomáliaértékekben regionális hatásként jelentkezik! A térképi adatrendszeren mindenféle feldolgozás nélkül egyértelműen felismerhető egy ilyen hatás, de a jobb szemléltetés céljából a négy fő égtáj szerint kiválasztott mintaszelvények mentén is ellenőrizhetjük ezt a hatást. A szelvények vízválasztótól vízválasztóig futnak, azaz a hegyek gerincén van a kezdetük és az átellenes végük is (3. ábra).

A szelvények mentén (5. ábra) látható az eredeti Bouguer-anomáliaérték, a harmadfokú polinomosztás görbéje (mint regionális hatás) és felette a maradékanomália-görbe, amely a Bouguer-érték és a regionális hatás közötti különbséget mutatja.

A szelvényeken jól látszik, hogy Magyarország területe a regionális hatás szempontjából mindig a maximum zónában ($-20 \div +20 \text{ mGal}$ között) helyezkedik el. A magas hegyektől származó, nagy negatív regionális hatás (amely eléri a -120 mGal -t) leggyengébb pontja ($+10 \text{ mGal}$) valahol a D-i, vagy DK-i országhatár közelében van, az Alföldön. Ez az a pont, ahol a hegyek izosztatikus gyökérzónájának oldalirányú gravitációs hatása a legkisebb. A maradékanom-

ália-görbéken látható, hogy pl. az Alföld területén negatív értékek jelennek meg, azaz a regionális hatás eltávolítása csökkentené a Bouguer-anomáliaértékeket. Egy pozitív regionális hatás (köpenykiemelkedés) kimutatása – a hegyek által előidézett nagy minimumok (-100 mGal körüli) között – szinte lehetetlen, de az izosztatikus anomáliában nemcsak a regionális minimumok, hanem a maximumok is jelen vannak.

A korrekció a hegyeink felett nem nagyon változtatná meg, inkább növelné a Bouguer-anomália értékét, az Alföldön csökkentené azt. Azt mondhatjuk, hogy Magyarországon összességében a regionális (izosztatikus) hatás kiszűrése megnövelné a kontrasztot a hegyvidéki és medence területek gravitációs hatása között, csökkentve az Alföld Bouguer-anomáliaértékeit.

Izosztatikus korrekció és az MGH-50 gravitációs adatbázis

Magyarországon az ELGI kezdte el 1950-ben a gravitációs alaphálózati méréseket. 1955-re elkészült az elsőrendű alaphálózat, amely 16 alappontból állt ($100\text{--}120 \text{ km}$ -es állomástávolsággal), valamint a másodrendű alaphálózat, amely 493 pontból állt ($10\text{--}20 \text{ km}$ -es állomástávolsággal). A nagy körülmények között igénylő alaphálózati mérések ismertetését és a mérések eredményeit a *Geofizikai Közleményekben* FACSINAY László és SZILÁRD József (1956) tette közzé. A Magyarországon 1950 óta hagyományosan a mai napig földtani kutatásra használt, több mint 385 000 adatból álló gravitációs adatbázis ennek az alaphálózatnak a felhasználásával született meg – ez az alapja, és innen származik az MGH-50⁶ (Magyar Gravitációs Hálózat, 1950) elnevezés is.

A cikkükhöz mellékeltek az országos első- és másodrendű állomások helyszínrajzát, az izovonalas Faye-anomáliatérképet, Bouguer-anomáliatérképet, valamint az izosztatikus anomáliatérképet.

Az alaphálózati mérési pontok adatairól táblázatot is találunk, amely tartalmazza a földrajzi koordinátákat, a Bouguer-, Faye- és izosztatikus anomáliák és korrekciók értékét is (lásd pl. 1. táblázat). A cikkben az izosztatikus korrekcióról talált információk alapján: „Az izoanomál térkép megszerkesztéséhez felhasználtuk Heiskanen izoanomál térképének értékeit és azokat a redukciós értékeket, amelyeket már korábban a Dunántúl 69 állomására kiszámítottunk.”

Sajnos a hivatkozott HEISKANEN-térkép nincsen feltüntetve az irodalomjegyzékben (talán HEISKANEN et al. 1959) – ezért nehéz utólag ellenőrizni a felhasznált értékeket, illetve meghatározni azok pontosságát. FACSINAY 1952-ben is hivatkozik HEISKANEN méréseire. Úgy tűnik, hogy domborzati térképek alkalmazásával lokális izosztatikus korrekciót végeztek, HEISKANEN izosztatikus redukciós táblázata alapján (a táblázat FACSINAY 1952-ben megjelent könyvének függeléke). Míg a lokális kompenzáció esetében egy tömegnek, pl. egy hegységnek a súlya csak vertikális irányban kompenzálódik, a regionális kompenzáció feltevésénél a kompenzáció vízszintes irányban is hat, annál messzebb, minél vastagabb a kéreg [FACSINAY 1952]. A következő idézet

⁵ A korrekciós sűrűség értéke talán túl nagy, bár ez csak a medenceterületek esetében okoz problémát, ahol viszont elenyésző magasságváltozások vannak. Másik korrekciós sűrűsre való átszámításhoz nem álltak rendelkezésre a kiindulási mérési és korrekciós adatok.

⁶ Az új országos gravitációs alaphálózat (MGH-2000) 46 pontból áll, és része az UEGN2000 európai hálózatnak [CSAPÓ 2008].

Table. 1. First order gravity base stations [FACSINAY and SZILÁRD 1956]

Állomás		Földrajzi koordináták		Adria feletti magasság	Faye	Bouguer ($\sigma = 2670 \text{ kg/m}^3$)	Izosztatikus	Faye	Bouguer	Izosztatikus
Szám	Név	Szélesség	Hosszúság	M	Korrekciók mGal			Anomáliák mGal		
I	Ferihegy	47,4182222	19,23927778	126,515	39,04	-14,14	21,8	16,03	1,89	23,69
II	Gyöngyös	47,8168333	19,962	272,968	84,24	-30,52	25,9	38,74	8,22	34,12
III	Szolnok	47,1324444	20,21672222	90,677	27,98	-10,14	16,5	14,62	4,48	20,98
IV	Szentes	46,6752778	20,26655556	83,026	25,62	-9,28	15,8	8,16	-1,12	14,68
V	Szeged	46,2528333	20,08736111	81,800	25,26	-9,15	13,8	20,41	11,26	25,06
VI	Békéscsaba	46,6771111	21,13175	86,463	26,68	-9,67	17,3	21,04	11,37	28,67
VII	Debrecen	47,4846389	21,63936111	108,249	33,40	-12,10	20,8	18,04	5,94	26,74
VIII	Nyíregyháza	47,98525	21,67888889	107,676	33,23	-12,04	23,0	11,70	-0,34	22,66
IX	Bánréve	48,3047778	20,36344444	897,410	50,85	-18,42	37,0	21,20	2,78	39,78
X	Esztergom	47,7599167	18,73819444	872,200	34,39	-12,46	24,7	28,58	16,12	40,82
XI	Győr	47,7054167	17,67430556	116,291	35,89	-13,00	21,8	1,42	-11,58	10,22
XII	Szombathely	47,2711944	16,64488889	216,891	66,93	-24,25	33,8	21,25	-3,00	30,80
XIII	Nagykanizsa	46,43325	16,95575	150,270	46,37	-16,80	22,4	10,16	-6,64	15,76
XIV	Pécs	46,0709167	18,20841667	127,235	39,26	-14,22	19,3	27,63	13,41	32,71
XV	Balatonszabadi	46,9048611	18,11777778	113,641	35,07	-12,70	19,7	27,06	14,36	31,06
XVI	Harta	46,70275	19,02936111	94,925	29,29	-10,61	16,2	26,45	15,81	32,04

1956-ból azonban rávilágít még néhány részletre: „További vizsgálatokra nyílik majd alkalom, ha Magyarország izosztatikus anomáliáit a környező országok izosztatikus anomáliáival együtt értékelhetjük ki. Remélhetőleg a közeljövőben részben a szomszédos országok munkáinak nyomán a Kárpát hegylánc és a Kárpát medence izosztatikus viszonyaira érdekes megállapítások tehetők.”

Több mint 50 év telt el, és ismét elővettük az izosztázia elméletét, néhány nemzetközi kutatási programnak köszönhetően! A cél az, hogy megvizsgáljuk, milyen hatással vannak a regionális földtani felépítésből származó anomáliák a magyarországi Bouguer-anomáliaértékekre. Ehhez azonban lássuk először, hogy milyen eredményeket értek el elődeink! Napjaink eszköztárát használva megjelenítettük FACSINAY László és SZILÁRD József 493 alaphálózati adatból készült Bouguer-anomáliatérképét (6. ábra), az izosztatikus korrekció értékét Magyarország területére (7. ábra), valamint az izosztatikus korrekció elvégzése után kapott korrigált Bouguer-anomáliatérképet (8. ábra).

Az izosztatikus anomália értéke a Ny-i és az É-ÉK-i határ mentén jelentős, +40 mGal körüli, az Alföldön viszont 10 mGal körüli értékre csökken a maximális értékekről. A Bakony- és a Mecsek-hegység lokális maximumként jelentkezik, de az anomália amplitúdója kisebb, mint az Alpok vagy a Kárpátok lábainak, az országhatár mentén.

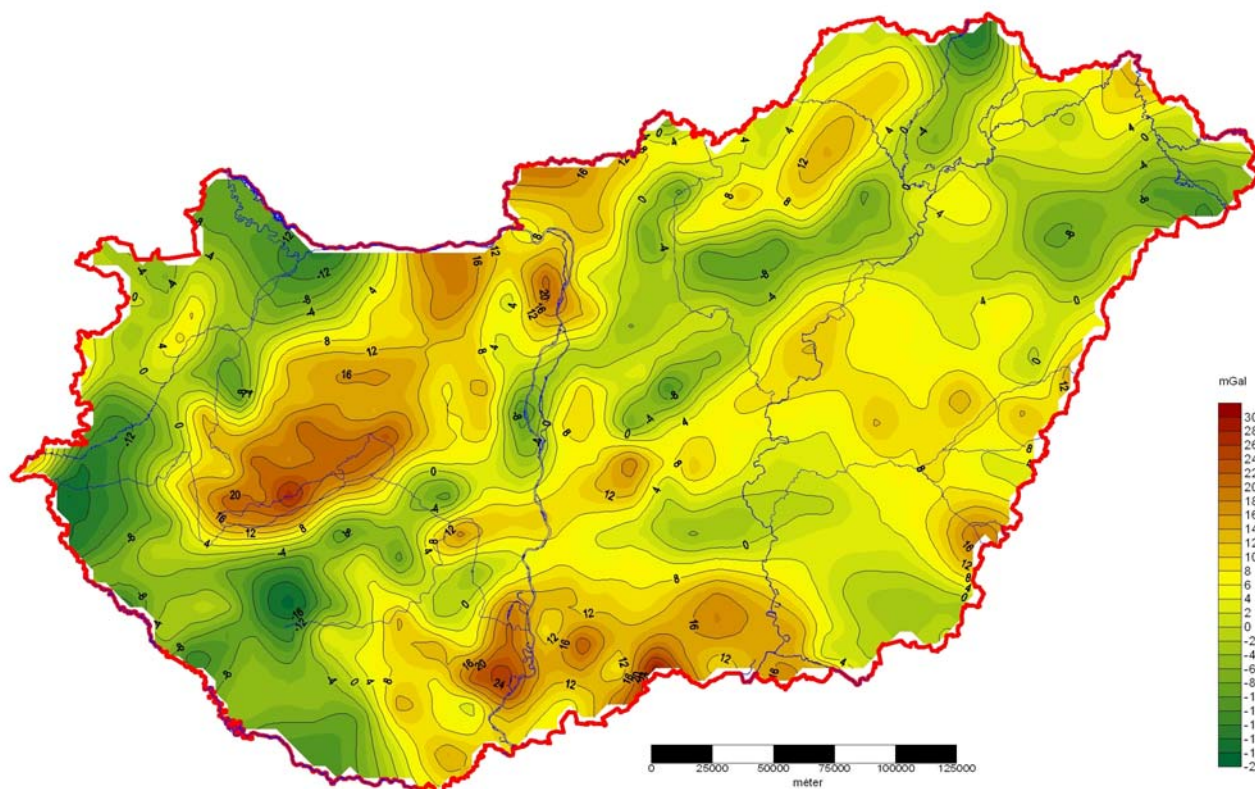
FACSINAY és SZILÁRD (1956) cikke alapján az alábbiakra lehet következtetni:

1. Az izosztatikus korrekció meghatározásánál feltételezhetően csak a magyarországi domborzatot és a magyarországi pontokat használták. Az nem derül ki egyértelműen, hogy a környező hegyek izosztatikus hatását milyen mértékben vették figyelembe. Bár egy korábbi publikáció [FACSINAY 1952] alapján valószínűleg AIRY–HEISKANEN lokális izosztatikus korrekcióját alkalmazták.

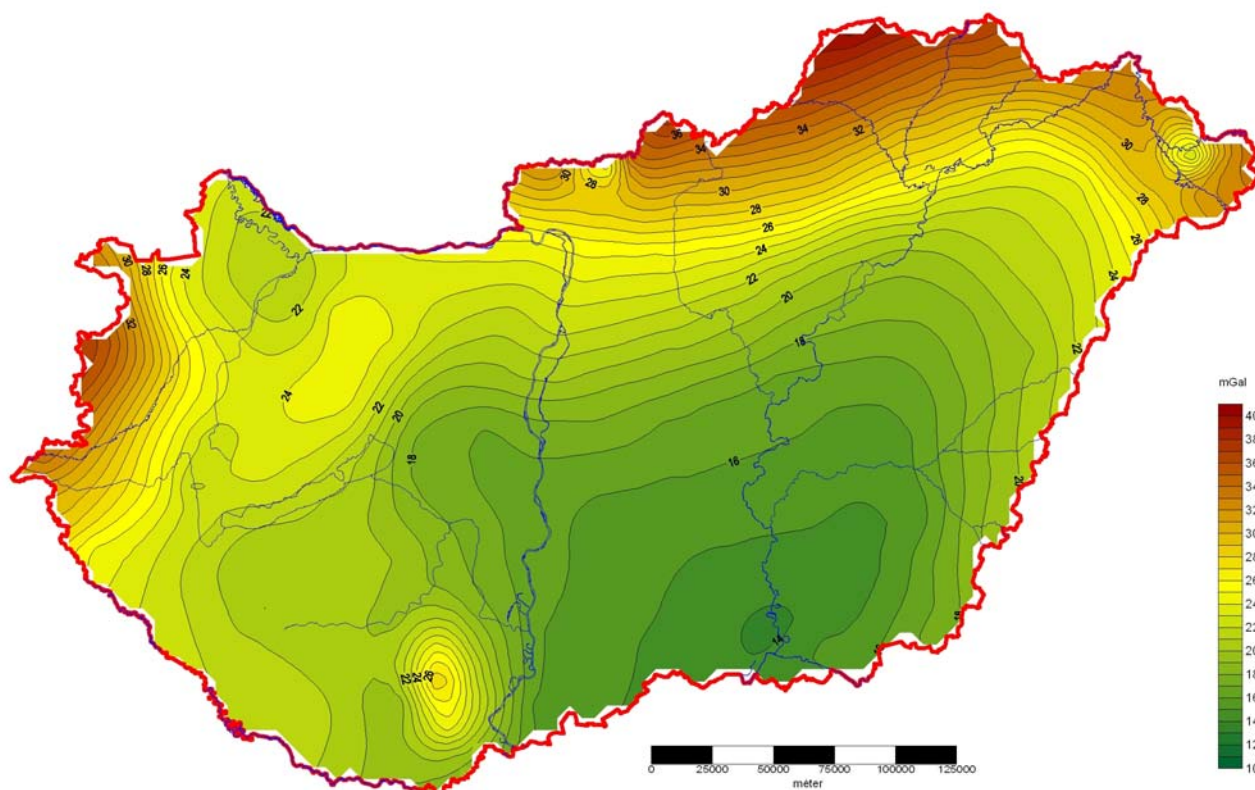
A modellezéseink (2. ábra) és vizsgálataink (5. ábra) alapján viszont nyilvánvaló, hogy a környező hegyvonulatok izosztatikus hatása áthúzódik Magyarország területére!

2. Az alaphálózati pontokra meghatározott izosztatikus korrekciók nem épültek be a ma is használt MGH-50 adatbázis (több százezer terepi mérési pontot tartalmazó) adattáblájába!

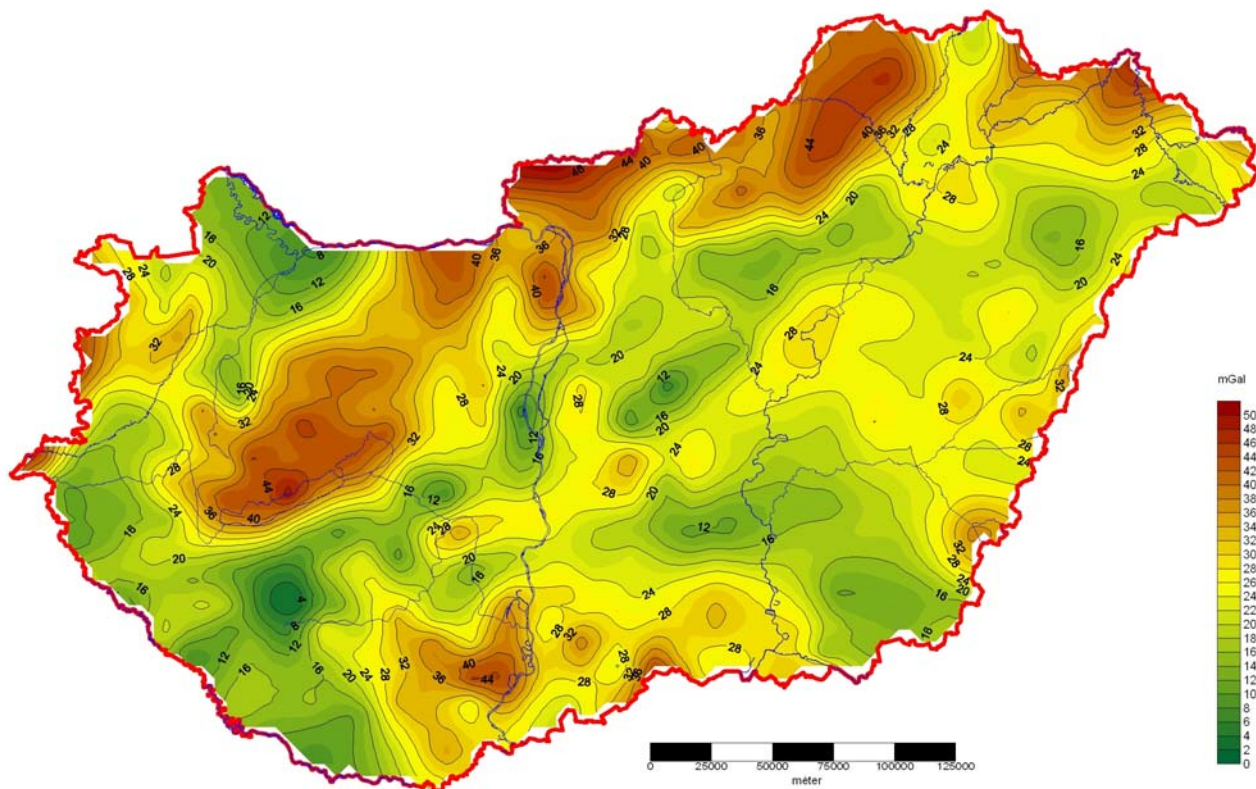
A magyarországi gravitációs adatbázis (MGH-50) a többi korrekciós paraméter mellett nem tartalmazza az izosztatikus korrekciót! Valószínűleg az 50-es években túl sok volt a bizonytalanság a mélyföldtani felépítéssel (pl. a Moho átlagos mélységével) és az izosztatikus korrekció megbízhatóságával kapcsolatban, s ezért nem használták az országos adatokon az izosztatikus korrekciót, és ezért nem került be az adatbázisba! A hagyományos földtani (felsőkéreg-) kutatás esetében – a vizsgálataink alapján – szükséges lett volna,



6. ábra. Bouguer-anomáliatérkép ($\sigma = 2670 \text{ kg/m}^3$) a másodrendű hálózat adataiból [FACSINAY és SZILÁRD 1956 adatai alapján]
 Fig. 6. Bouguer anomaly map based on data of second order gravity base stations [based on data of FACSINAY and SZILÁRD 1956]

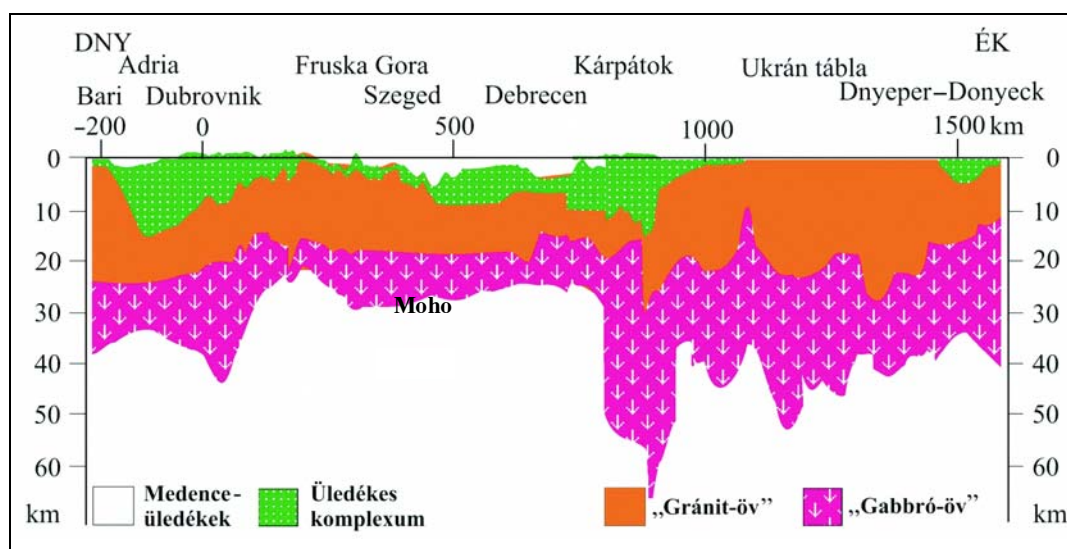


7. ábra. A másodrendű hálózat alappontjain meghatározott izosztikus korrekciótérkép [FACSINAY és SZILÁRD 1956]
 Fig. 7. Isostatic anomaly map based on data of second order gravity base stations [FACSINAY and SZILÁRD 1956]



8. ábra. Izosztatikusan korrigált Bouguer-anomáliatérkép a másodrendű hálózat adataiból [FACSINAY és SZILÁRD 1956]

Fig. 8. Isostatically corrected Bouguer anomaly map based on data of second order gravity base stations [FACSINAY and SZILÁRD 1956]



9. ábra. Egy Horvátországtól Ukrajnáig terjedő litoszférakutató szeizmikus szelvény értelmezési vázlata [POSGAY K. et al. 2003]

Fig. 9. Interpretation sketch of lithospheric seismic profile extended from Croatia to Eastern Ukraine [POSGAY K. et al. 2003]

mert olyan regionális hatásokat tükröz, amelyek hibás modellezési eredményekhez vezetnek.

A Bouguer-anomáliatérkép értelmezése

Amint azt a 4. ábra mutatja, Magyarország területe a hagyományosan előállított európai Bouguer-anomáliatérképen maximumként jelentkezik.

A gravitációs mérések hagyományos földtani alkalmazása szerint, a felszíni vastag medenceüledékek gravitációs minimumokat okoznak, mivel a törmelékes üledékek sűrűsége a jelentős porozitásukból adódóan kicsi. A felszínen található idősebb karbonátos üledékek, valamint a metamorf és magmás képződmények gravitációs maximumokat okoznak, mivel jóval kompaktabbak, tömöttebbek (már egyszer megjárták a nagyobb mélységet, és csak az újabb kéregmozgá-

soknak köszönhetően vannak a felszínen vagy felszínközeli).

Persze más alkalmazás is lehet, például olyan területeken, ahol az üledékes medence gyakorlatilag hiányzik. Ott a gravitációs értelmezés elsődleges célja a litoszférakutatás, a Moho diszkontinuitásfelület mélységének meghatározása. Tehát a Bouguer-anomáliatérkép felhasználhatósága a kutatás céljától, és léptékétől függ.

Hogyan lehet tehát az izosztatikus hatással terhelt közép-európai Bouguer-anomáliatérképet földtanilag értelmezni? Ha egy szóval akarnánk válaszolni, akkor azt kellene mondanunk, hogy nehezen – gondoljunk csak az Alföldre!

Első közelítésben az európai Bouguer-anomáliatérkép a Moho-szintet adja vissza! Mivel a Moho nem más, mint a kéreg–köpeny határ, így a hegyek gyökérzónája a Moho szintjében jól visszatükröződik. Ez látszik az egyik korai litoszférakutató szeizmikus szelvény értelmezésén is (9. ábra). Ez a felismerés csak a gravitációs alaphálózat kiépítése, a területi mérések összedolgozása (50-es évek) és a nagy mélységet kutató szeizmikus mérések értelmezési eredményeinek köszönhetően vált általánosan elfogadottá.

A Moho-felület határvonala a Kárpátok és a Dinaridák alatt az átlagosnál jóval mélyebbre kerül. Az ábráról áttételesen az is látszik, hogy csak a magyarországi gravitációs adatokból, a szelvény mentén, a Moho mélységét meghatározni a változás léptéke (Magyarország kis mérete) és az ekivalencia miatt nem nagyon lehet.

Nyilvánvalóan ahhoz, hogy a gravitációs anomáliatérkép, például medencealjzat-meghatározás céljából értelmezhetővé váljon, el kell végezni az izosztatikus korrekciót, megsza-

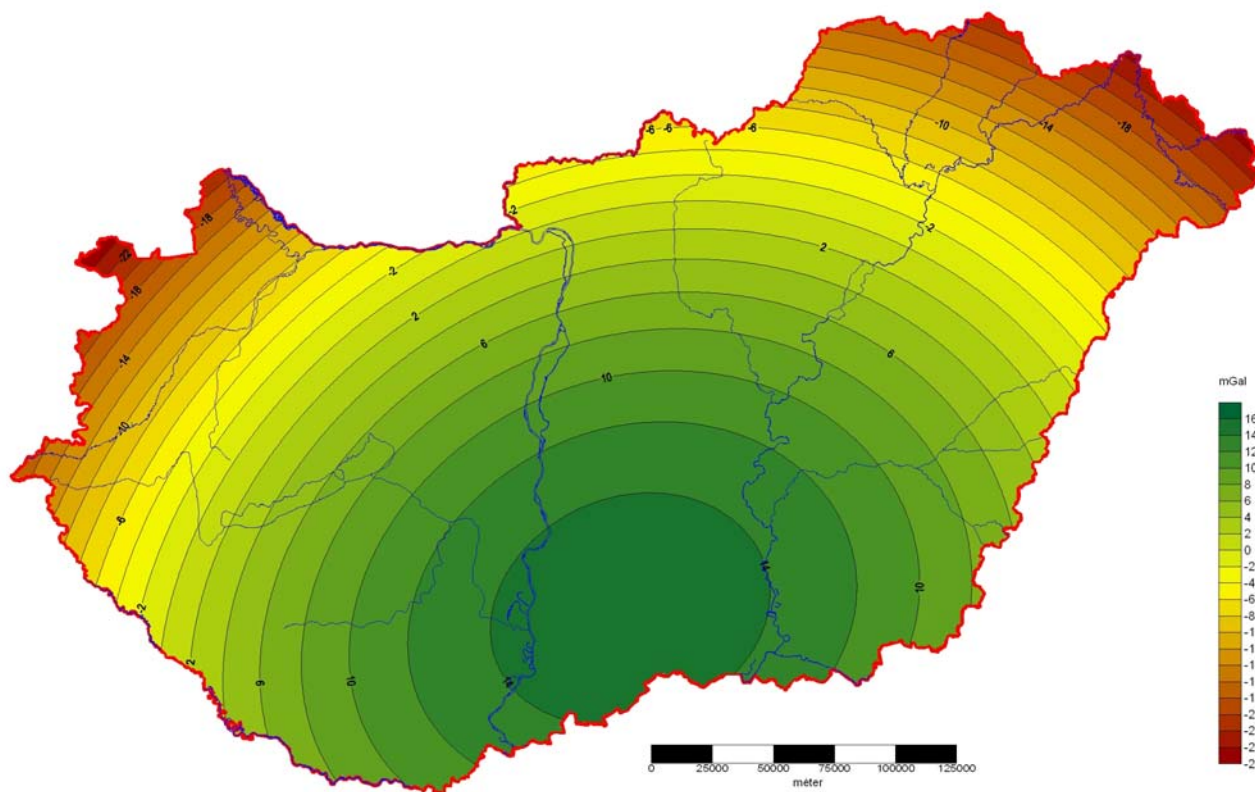
badítva a Bouguer-anomáliaértékeket a mélybeli hatásoktól, a kéreg–köpeny határ mélységéből adódó változásoktól, azaz a Moho felszínének hullámzásától.

Magyarországon először, ahogy már ismertettük, az 50-es években jelentkezett az igény arra, hogy az izosztatikus hatást figyelembe vegyék a jobb földtani értelmezés céljából [FACSINAY 1952; FACSINAY és SZILÁRD 1956]. Később a Bouguer-anomáliatérkép értelmezése során is fel-felmerült, hogy valami nincs rendben (Szendrői-hegység vizsgálata – KOVÁCSVÖLGYI, SCHÖNVISZKY (1994), Békési-medence – POSGAY et al. (1991), Kisalföld – NEMESI et al. (1994)), de feltételezhetően az adatok titkossága (és az országhatár) gátat szabott a regionális hatások számításának és az izosztatikus korrekció elvégzésének. Magyarország területileg kicsi, és nincsenek is nagy hegyei, így ez a szakmai hiba elkerülhetetlen volt, de hol vannak az Alpok, Kárpátok és Dinaridák területén fekvő országok izosztatikusan korrigált Bouguer-anomáliatérképei? Feltehetően a „saját területet lefedő adatokban való gondolkodás” miatt ezek sem tudtak elkészülni.

Hogyan tovább?

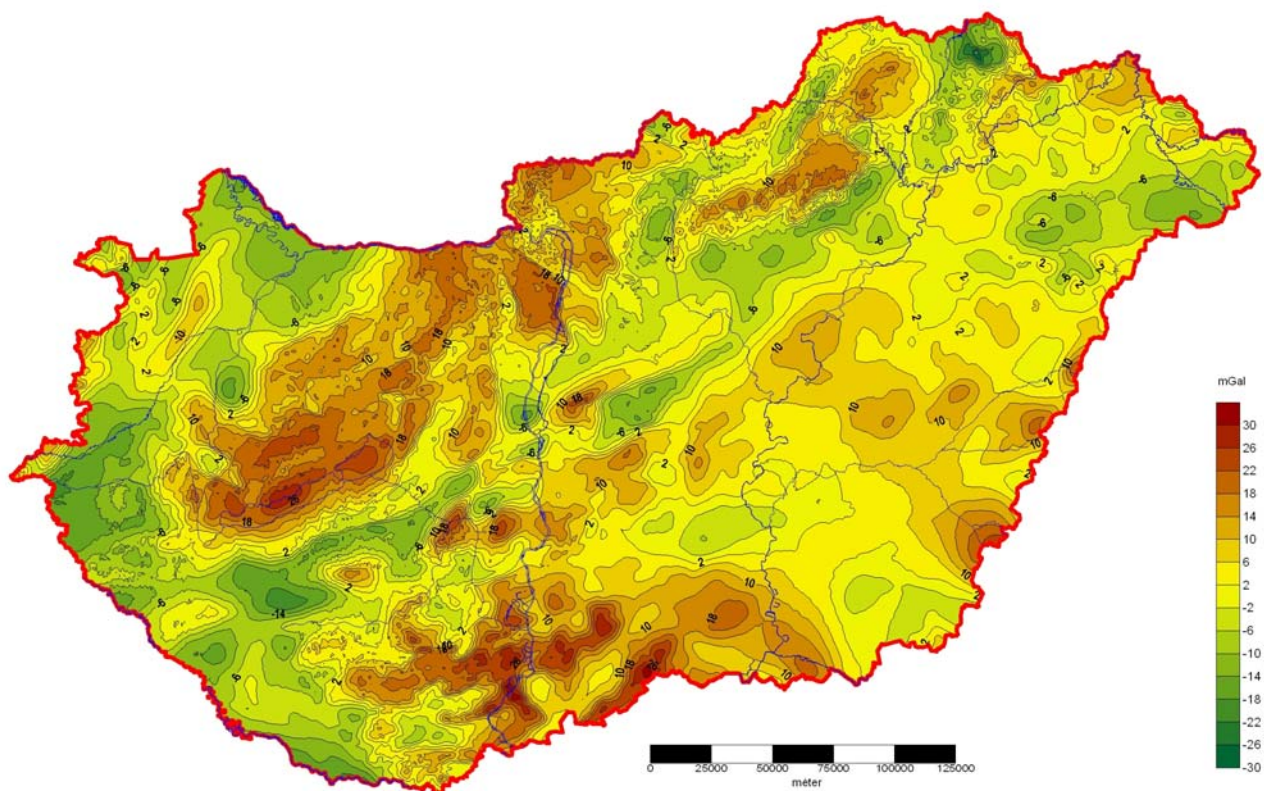
Az országos Bouguer-anomáliatérképet a lokális földtani felépítés mellett a tágabb környezet izosztatikus hatásai határozzák meg. Ez utóbbit a földtani értelmezés érdekében korrigálni kell. Két lehetőség adódik:

1. Közép-európai Bouguer-anomáliatérkép alapján a regionális hatás meghatározása és kivonása a magyarországi Bouguer-anomáliatérképből



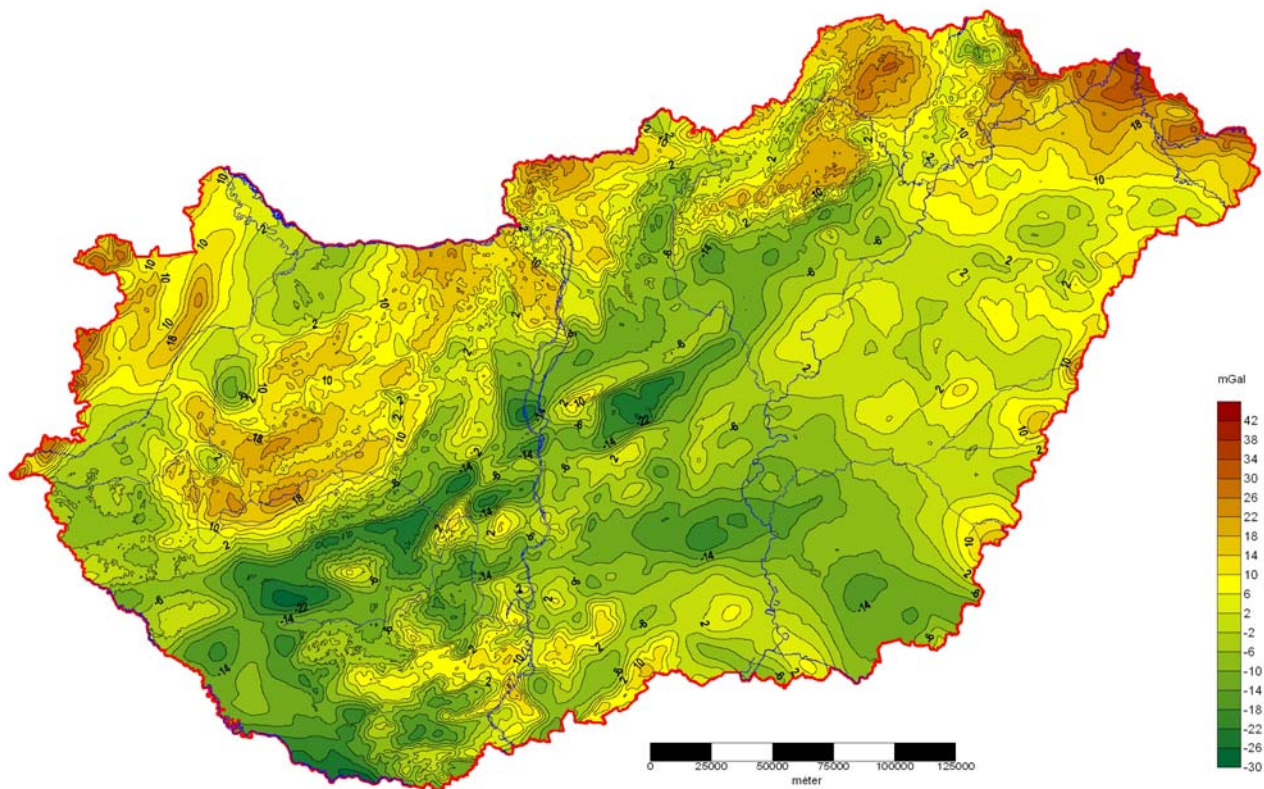
10. ábra. A közép-európai Bouguer-anomáliatérkép alapján meghatározott regionális hatás (harmadfokú felület)

Fig. 10. Regional gravity effect (3rd order surface) based on the Central European Bouguer anomaly map



11. ábra. Magyarország Bouguer-anomáliatérképe (korrekciós sűrűség: 2670 kg/m^3)

Fig. 11. Bouguer anomaly map of Hungary (reduction density: 2670 kg/m^3)



12. ábra. A harmadfokú regionális hatástól mentes Bouguer-anomáliatérkép

Fig. 12. Bouguer anomaly map corrected by the 3rd order approach of the regional effect

2. táblázat. Az alap és származtatott térképek statisztikája

Table 2. Statistics of the basic and derived maps

Terület	Év	Térkép	Minimum	Maximum	Medián	Középérték	Szórás
HU	1956	Bouguer-anomália	-18,41	29,20	3,46	3,45	8,12
		Izosztatikusan korrigált Bouguer	2,13	51,67	24,40	25,31	8,76
		Izosztatikus korrekció	13,82	40,09	21,07	21,87	5,45
	2010	Bouguer-anomália	-30,97	32,83	3,24	3,30	9,09
		Izosztatikusan korrigált Bouguer	-29,14	23,57	-5,91	-4,49	9,48
		Izosztatikus korrekció	-15,53	15,24	-6,67	-6,45	4,97
		Tr3 korrigált Bouguer	-28,36	41,25	0,14	0,62	10,86
		Tr3 (3-adfokú regionális trend)	-26,28	15,27	4,83	2,68	9,72
	C-EU	Bouguer-anomália	-127,13	27,38	-16,70	-23,77	29,23
		Izosztatikusan korrigált Bouguer	-98,34	62,16	-4,34	-8,15	21,41
		Izosztatikus anomália	-96,71	24,32	-1,76	-8,08	22,61

Az országos adatrendszeren elvégzett trendvizsgálatok arra utaltak, hogy a kétismeretlenes, másod- és harmadfokú Gauss-féle négyzetes közelítéssel (trendszűrés) meghatározott regionális trend kivonása után [KISS és TÓTH 2005; KISS et al. 2005; KISS 2006] a Bouguer-anomáliatérkép a felszíni földtani ismereteket jobban tükrözi vissza, vagyis az értelmezési problémák oka egy regionális gravitációs hatás.

A külföldi együttműködéseknek és a nagy litoszférakutató európai kutatási programoknak köszönhetően a közép-európai Bouguer-anomáliatérkép a rendelkezésünkre áll. Trendszerűségek segítségével különböző felületeket tudunk illeszteni a Bouguer-anomáliatérképre, s ilyen módon ki tudjuk szűrni a regionális hatásokat. Az egyetlen bizonytalanság a regionális hatást leképező felület megadása: első-, másod- vagy harmadfokú kétdimenziós felületet használunk-e? A regionális hatást azonban ebben az esetben valós mérési eredményekből származtatjuk, így ez a számítás mentes a szubjektivitástól.

A regionális hatást, a harmadfokú felületet (10. ábra) úgy jelenítettük meg, hogy az izosztatikus korrekciók térképeivel (7. ábra, majd később 14. ábra) vizuálisan összevethető legyen, azaz a maximum zöld, és a minimum barna színnel jelenik meg.

A 10. ábra alapján látható, hogy a regionális hatás maximuma Kiskunhalas környékén van, ahonnan minden irányban csökken a hatás mértéke, a minimális értékek az ÉNy-i és ÉK-i határok mentén jelentkeznek, az Alpok és a Kárpátok izosztatikus gyökérvonaljának hatása miatt.

A 11. ábra a magyarországi adatok alapján az országos Bouguer-anomáliatérképet mutatja. A 12. ábra a regionális hatástól megtisztított, azaz maradék Bouguer-anomáliatérképet mutatja.

Az Alpok-alja maximumai erősödtek fel, valamint az ÉK-i határrész maximumai Vilyvitány környékén, ugyanakkor kisebb jelentőségű vált Telkibánya környékén, az ország egyik legjelentősebb minimuma (11. ábra). A Szendrői-hegység is nagyobb gravitációs maximumot ad, mint a

Bükk-hegység, a földtani felépítéssel összhangban. Az eredeti Bouguer-anomáliatérképen ez fordítva van!

Tulajdonképpen már ezek az eredmények is nagyon jónak tűnnek, ugyanakkor a harmadfokú felület túl sima lefutásúnak tűnik – a Kárpátok–Alpok–Dinaridák domborzata ennél sokkal változatosabb, így azok izosztatikus hatása is ettől eltérő lesz. Célszerű tehát egy másik megoldást is megvizsgálni.

2. Az izosztatikus korrekció meghatározása Közép-Európa domborzati térkép alapján

Közép-Európa digitális domborzati térképe (SRTM) már az internetről is letölthető (3. ábra). Az izosztatikus gyökérvonalak 25 km-nél nagyobb mélységű tömegek hatásai, ezért nem kell túlságosan jó felbontású domborzati modellel⁷ rendelkezni – az izosztatikus hatások nagy hullámhosszúságú anomáliákként jelentkeznek és szuperponálódnak.

Az izosztatikus hatás kiszámolásához nem kell más, mint egy modellező program, amellyel kiszámoljuk ezt a regionális hatást. Az izosztatikus korrekció során ezzel az értékkel korrigáljuk az országos Bouguer-anomáliatérképet.

Kérdés csak a vonatkoztatási szint, azaz az anomáliamentes kéreg–köpeny határ átlagos mélysége. Ennek a szintnek az értékét célszerű korábbi, pl. szeizmikus mérések alapján [POSGAY et al. 1991] meghatározott Moho-mélység alapján kiválasztani.

Számításainknál Magyarország területére a 25 km-es⁸ vonatkoztatási szintet választottuk, ez a Moho minimális mélysége. Ehhez viszonyítva számoltuk ki a környező hegyek izosztatikus gyökerét az (1) összefüggés alapján, majd azok gravitációs – izosztatikus – hatását (13. ábra). A számítás-hoz PARKER R. L. (1973) algoritmusát használtuk.

⁷ Egy ekkora terület nagy felbontású topográfiai adatrendszere, a mérete miatt szinte kezelhetetlen.

⁸ Választhattunk volna akár a 30 km-es európai átlagos mélységszintet is.

A számolás során a kéreg vastagsága, mint konstans réteg, benne van a számított hatásban. Ezt eltávolítottuk ugyanúgy, mint ahogy ezt a Bouguer-korrektció (közvetlen-korrektció) során tesszük. Lehetőség adódik az esetlegesen hibás átlagos Moho-mélység korrigálására is, mert noha mi választottuk ki – emiatt pontosan tudjuk a számításhoz használt átlagos kéregvastagságot és a sűrűségkontrasztot is –, mégis célszerű a leggyakoribb értékkel csökkenteni a számított értéket, mert statisztikusan ez adja meg legjobban a kéreg hullámzásának a hatását (az izosztatikussal hatás lehet pozitív és negatív is). Ha hibáznunk is, a hiba a relatív Bouguer-értékek miatt csak egy konstans szinteltolást jelent, ami geofizikai szempontból megengedhető.

A kapott felület a Moho felszínével korrelál (14. ábra) és csak néhány részletében tér el FACSINAY-féle izosztatikussal korrekciótérképtől (7. ábra). Látszik, hogy még a Bakony-nak is van izosztatikussal hatása, ez jelenik meg a litoszférakutató CEL08 szelvény szeizmikus sebességszelvényén is [KISS 2009a], vagy az Alpok izosztatikussal hatása az ország Ny-i határszélén, a CEL07 litoszférakutató szeizmikus szelvény feldolgozásában [KISS 2009b].

Az Alföldön a relatív izosztatikussal korrekció értéke negatív (itt a legkisebb), azaz csökkenni fog az Alföld felett a Bouguer-anomáliaérték, mert megszűnik a regionális hatás.

A korrigált Bouguer-anomáliatérkép (15. ábra) országos szinten kontrasztosabb lett, az idős képződményekből álló kiemelt blokkok gravitációs képe sokkal jobban megfelel a felszíni sűrűségeloszlásból adódó képnek és a medencealjzat lefutásának nyomon követésére is alkalmasabb a térkép.

A harmadfokú regionális hatás alapján végzett korrekcióval ellentétben a valódi domborzat alapján számolt korrekció az ország ÉK-i, alföldi részein nem növeli meg olyan jelentősen a Bouguer-anomáliaértékét. A Nyírségben viszont a jelentős minimumok vannak, és az Alföldön is több széles minimum zóna (részmedence?) rajzolódik ki a korrigált térképen.

A 2. táblázat az alap Bouguer-anomáliatérképek, és a származtatott térképek statisztikáját mutatja.

Izosztázia és geodinamika

Az izosztatikussal korrekciónak köszönhetően sikerült egy regionális hatást kiszűrni az országos Bouguer-anomáliatérképből – legalábbis a földtani (pl. medencealjzat-) kutatás szempontjából egy jobb térkép áll rendelkezésünkre. Ennek ellenére úgy tűnik, hogy a regionális gravitációs hatásoktól – európai szinten – nem sikerült teljesen megszabadulni, ami teljesen normális (az izosztatikussal korrekció statikusan csak a kéreg–köpeny felszínének változásából adódó hatásokat kompenzálja). Nagy negatív anomáliák maradtak a Kárpátok vonulata mentén ÉK-en és DK-en (16. ábra), amelyek eredete ismeretlen. Az izosztatikussal korrekció után megmaradó anomáliák egy része valószínűleg lemeztektonikai okokra vezethető vissza. Az izosztatikussal korrekcióval a földtani „időfaktor” nem tudjuk figyelembe venni, azaz adott időpontbeli izosztatikussal állapotot tudunk csak kiszámítani, de ez nem feltétlenül egy izosztatikussal egyensúlyi állapot, hanem annak csak az aktuális, pillanatnyi állása (mivel idővel az is változik). Ezek alapján Közép-Európa úgy tűnik még nincsen izosztatikussal egyensúlyban.

A litoszférát felépítő kőzetek képlékeny változása (az izosztatikussal egyensúlyhoz vezető „lassú” folyamatok) és a merev lemezek között lezajló „gyors” geodinamikai folyamatok (pl. a szubdukció⁹) eltérő időtartalmú változásokat jelentenek.

Az izosztatikussal egyensúly irányába mutató vertikális változások sokkal hosszabb idejűek, lassabbak (1–2 mm/év – JOÓ 1992, esetleg 5 mm/év, pl. az Erdélyi-medencében és a Keleti-Kárpátokban – POPESCU és LAZARESCU (1988)), mint a kéreglemezek horizontális irányú mozgása (szubdukciós zónák tektonikai rekonstrukciója alapján 40–80 mm/év – HORVÁTH 2006, HORVÁTH és DOMBRÁDI (2008)). A gyors kéregmozgások velejárója ugyan a tömegkiegyenlítődés hosszan elnyúló folyamata, de a kétféle földtani folyamat eltérő sebességgel zajlik.

Ezzel kapcsolatban FACSINAY László (1952) írta nagyon találóan: „A szilárd kéreg alatt olyan réteg következik, amely a tartós deformáló erő hatására plasztikusan viselkedik, a rövid periódusú erőknél viszont nagy merevséget mutat. Például szokták hozni a peccsétviaszt, amely ha lassú, hosszantartó deformáló erőnek van kitéve, behajlik, hirtelen erő hatására azonban eltörik.”

A visszamaradó anomáliák tehát ott jelentkeznek, ahol a horizontális irányú kéregmozgás (szubdukció?) folyamatban van, vagy „éppen” csak befejeződött, így az izosztatikussal egyensúly még nem állt be.

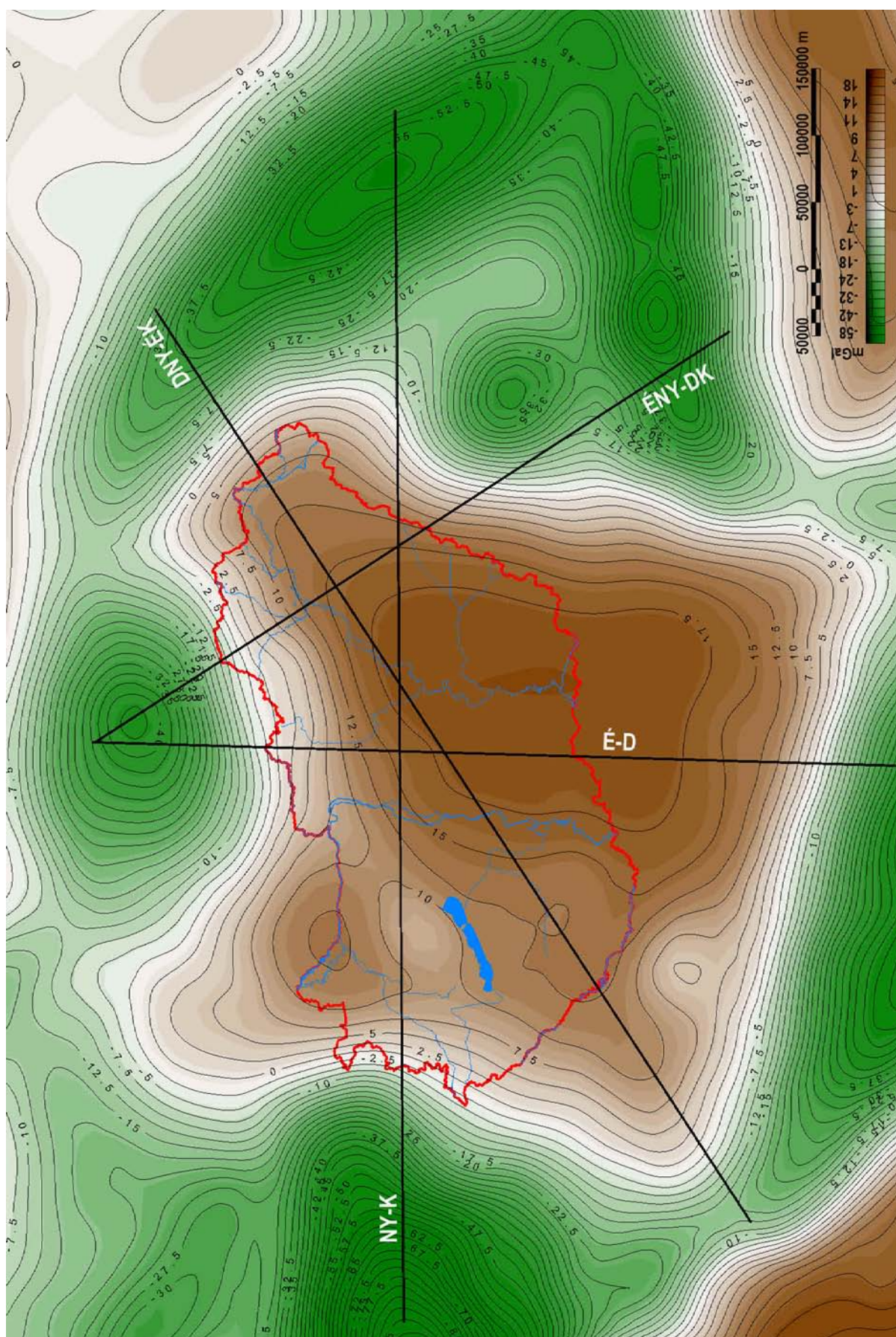
SCHEFFER Viktor tanulmányaiban [SCHEFFER és KÁNTÁS 1949] egyenesen összekapcsolta az izosztatikussal anomáliákat és a földkéreg epirogenetikus (függőleges) mozgásait. Természetesen az izosztatikussal kiegyenlítődés folyamata függőleges kéregmozgással együtt jár, de ha a mozgások miatt nem alakulna ki tömegfelesleg (vagy tömeghiány), akkor a kiegyenlítődés sem kezdődne el. SCHEFFER második tanulmányában viszont az izosztatikussal anomáliákat veti össze az orogenetikus (vízszintes) jellegű mozgásokkal, felismerve a gyors geodinamikai folyamatok és lassú kiegyenlítődések közötti kapcsolatot [SCHEFFER 1952].

Közép-Európa területén az izosztatikussal korrekció után is visszamaradó regionális jellegű Bouguer-anomáliák (minimumok) alapján – a legjelentősebbek az ország határain kívül figyelhetők meg – kéregmozgásra és a kéregmozgás irányára (16. ábra) lehet következtetni. Ezek a hatások a térképen úgy jelentkeznek, hogy máshol van a hegygerinc-

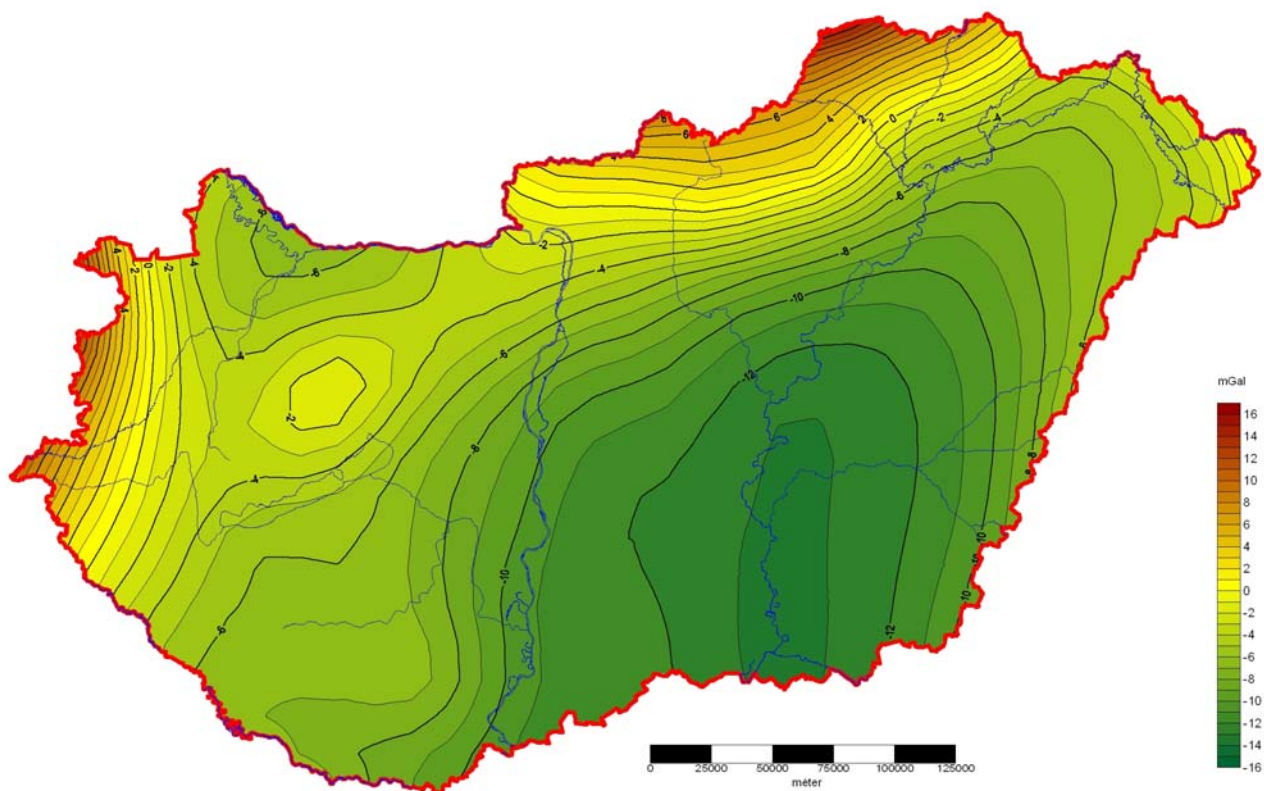
⁹ Ehhez nem árt néhány kiegészítő lemeztektonikai információ:

„A Kárpát-medence térsége a földtörténet során számos kis lemez képződési és egymáshoz ragadási helye volt. A Kárpát-medence alapvetően két mikrolemezből áll: az Afrika-peremi eredetű Alcapa-mikrolemez és az eurázsiai eredetű Tisza-Dácia mikrolemez” [CSONTOS 1998]. E két mikrolemezt együttesen Pannon szegmensnek is hívják [BEHM et al. 2007].

„A térség jelenleg kompressziós erő hatására áll, amely elsősorban az Adriai mikrolemez északias mozgásával és nyomásával hozható összefüggésbe. Ez a viszonylag kis méretű litoszféraszegmens ütközik, préselődik a területnek, létrehozva a Pannon-térség recens, főképp kompressziós feszültségerét. Hasonló helyet találunk a Vrancea-zóna környékén is, ahol K-ről az európai lemez Kárpátok alá szubdukciójának megszűntével szintén erős, a kárpáti ívre nagyjából merőleges nyomás hat a területre. Nyugatról a Cseh-masszívum délkeleti pereme felől is komoly nyomóerők hatnak” [BADA és HORVÁTH 1998].

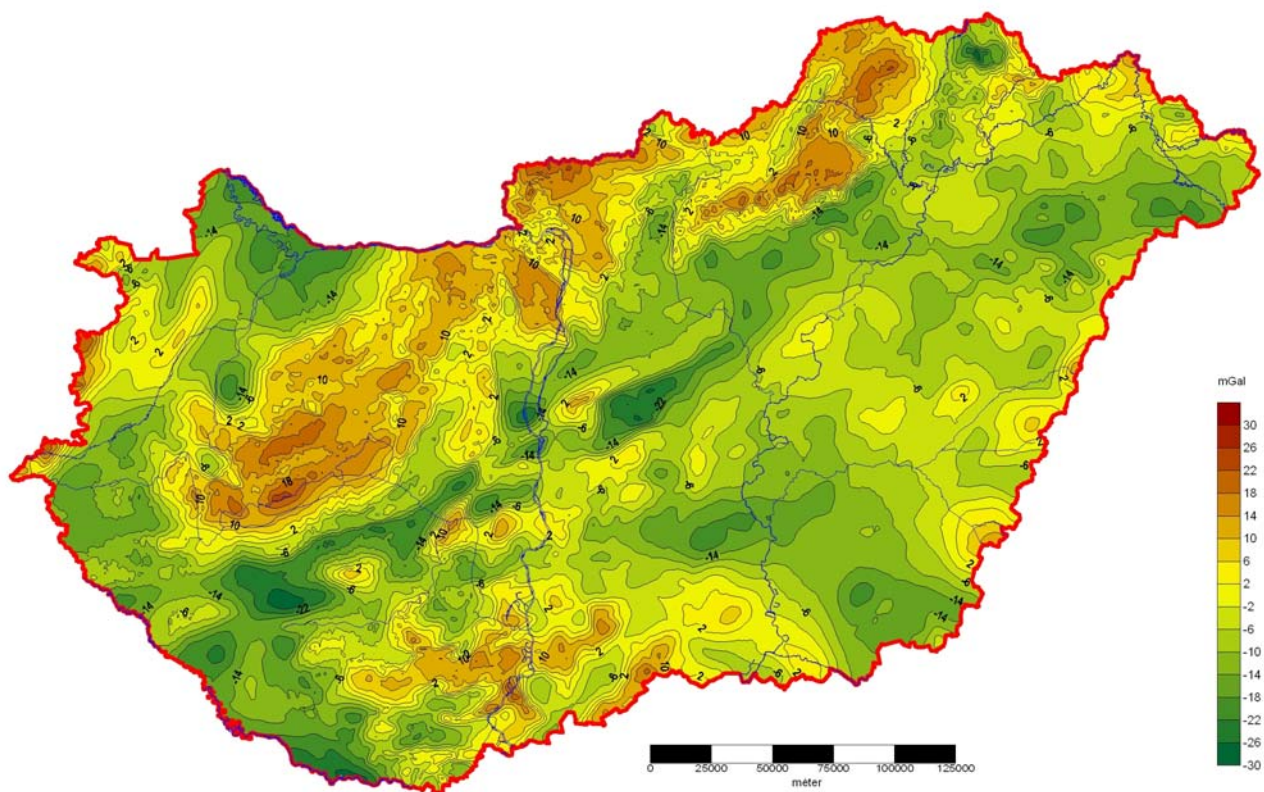


13. ábra. Közép-Európa izosztikus anomáliatérképe
Fig. 13. Isostatic anomaly map of Central Europe



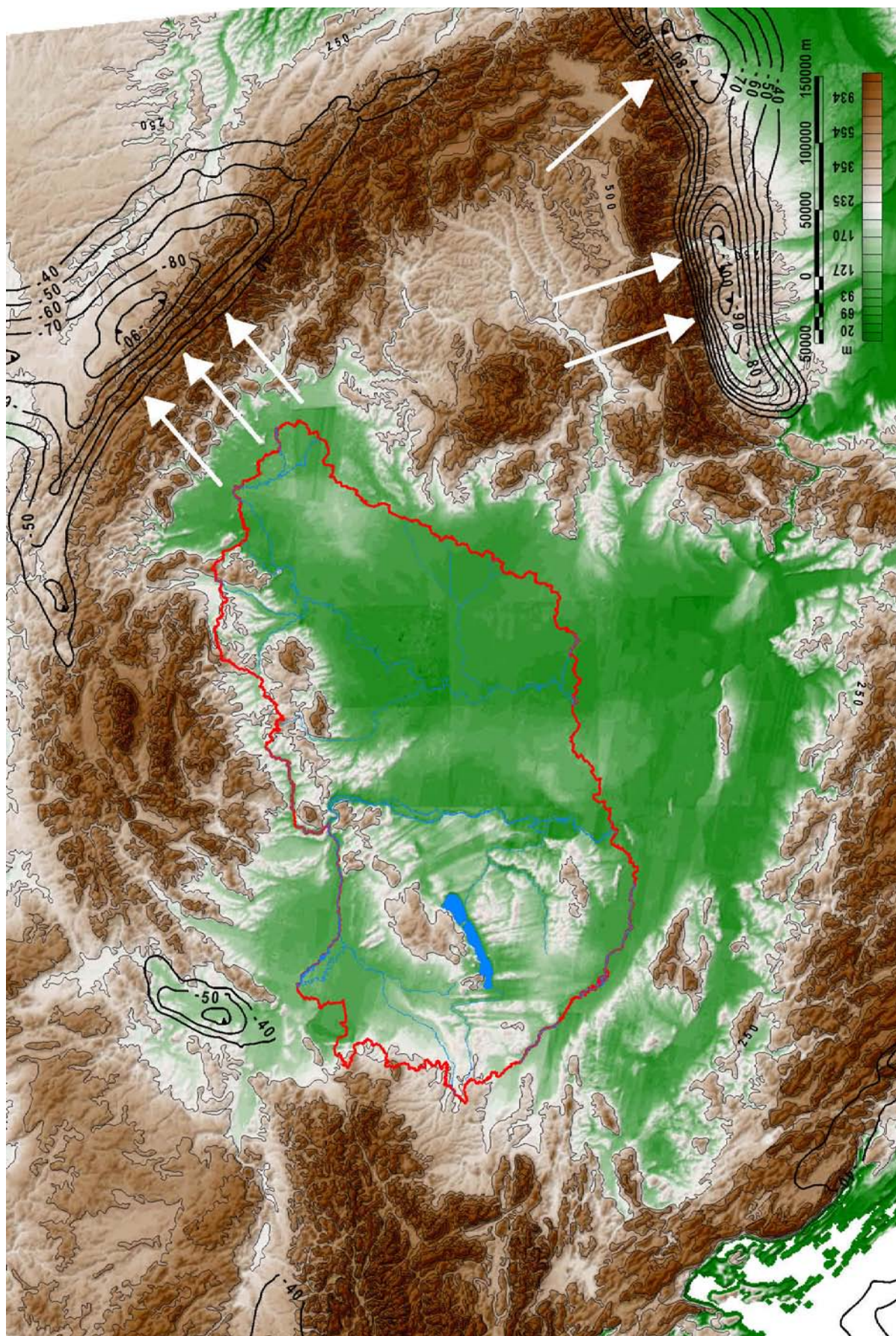
14. ábra. Az európai domborzati térkép alapján meghatározott izosztikus korrekciótérkép (Magyarországra)

Fig. 14. Isostatic anomaly map of Hungary calculated by using the European topography data



15. ábra. Magyarország izosztikusan korrigált Bouguer-anomáliatérképe

Fig. 15. Bouguer anomaly map of Hungary after isostatic correction



16. ábra. Izosztatikus korrekció után megmaradó nagy negatív regionális anomáliák (nyilakkal a feltételezhető mozgás iránya)

Fig. 16. The large gravity minimum anomalies after isostatic corrections (supposed direction of moving indicated by arrows)

magasság adatai alapján számított legnagyobb izosztatikus hatás¹⁰, és máshol van a Bouguer-anomáliából meghatározható legjelentősebb minimum (lásd a Kárpátok íve mentén, Ny-ról K-felé haladva változik a domborzati maximum és a Bouguer-minimum egymáshoz viszonyított helyzete). A domborzat és a Bouguer-anomália „elcsúszása” egymáshoz képest több szerző munkájában is felismerhető [DÉREROVÁ et al. 2006; ZEYEN et al. 2002].

Leegyszerűsítve azt mondhatnánk, hogy az izosztatikus egyensúlyt a kéreglemezek oldalirányú „gyors” mozgása megbontja, az ok és az okozat szétválik, aszimmetrikus szerkezet alakul ki, olyan, mint amilyen egy klasszikus szubdukciós zóna. Feltételezhetően a kéregmozgás az első, amelyet követ az izosztatikus kiegyenlítődés.

A kéregmozgás következménye kettős:

- egyrészt hegyeket épít a felszínen az összetorlódó kéreg anyagából,
- másrészt mélyen a köpenybe nyúló szerkezetet idéz elő, mint amilyen a szubdukciós zóna.

Az első esetben a litoszféra viszkozitásától, képlékenységtől függően lassú izosztatikus kiegyenlítődés (izosztatikus gyökérvonak kialakulása) miatt jelentkezik negatív gravitációs anomália. A második esetben a kisebb sűrűségű kéreglemez nagyobb sűrűségű köpenybe nyomulása miatt lép fel tömeghiány, ami miatt regionális gravitációs minimum alakul ki, amelyet a hagyományos gravitációs korrekciókkal nem lehet kompenzálni! Így ezek a hatások az izosztatikus korrekció után is megmaradnak a Bouguer-anomáliatérképen.

A nagy regionális gravitációs anomáliák közül kompenzálhatjuk a hegyvonulatok alatti izosztatikus hatásokat az izosztatikus korrekció segítségével, nem lehet viszont kompenzálni a gyors geodinamikai folyamatok hatását, amelyek az izosztatikus korrekció után is regionális anomáliaként jelennek meg a Bouguer-anomáliatérképen.

Az izosztatikus kiegyenlítődés hatása is kettős:

- az összetorlódó kéreganyag tömegének kiegyenlítése (gyökérvonak kialakulása),
- köpenybe mélyülő szerkezet hatásának kompenzálása (pl. a terület emelkedése).

A köpenybéli konvekció okozta kéregmozgások és az izosztatikus kiegyenlítődés minden esetben együttesen van jelen. A két folyamat párharcának vagyunk tanúi, és a harc eredménye az, ami a Bouguer-anomáliatérképen megjelenik. A kérdés, hogy mennyire tudjuk a hatásokat felismerni, azonosítani és felhasználni a földtani célú gravitációs feldolgozások során.

Következtetés

E tanulmányban a regionális gravitációs anomáliák vizsgálata alapján próbáltuk az Alföld területének viszonylag magas Bouguer-anomáliaértékeit megmagyarázni. A közép-

európai Bouguer-anomáliatérkép alapján a környező hegyvonulatok izosztatikus hatásának megjelenését lehetett feltételezni a Kárpát-medencében.

A hatás a regionális szelvények és a közép-európai Bouguer-anomáliatérkép alapján is jól azonosítható. Látszik, hogy nem a Kárpát-medencében vannak sajátos gravitációs maximumok, hanem a környező hegyek izosztatikus hatásai miatt vannak nagy negatív anomáliák körülöttünk. A Kárpát-medence közepe felé haladva ez a hatás egyre kisebb, és így lokális maximumot (13. ábra) okozhat a medence közepén.

Az izosztatikus hatást különféle eljárásokkal meghatároztuk, s elvégeztük az izosztatikus korrekciót. A korrekció után valóban csökken a Bouguer-anomália átlagos szintje az Alföldön – miközben az ország É-i és Ny-i, hegyvidéki részein a korrekció miatt az anomáliák növekednek.

Az Alföldön a korrekció elvégzése után is megmaradó gravitációs maximumok (mivel a laza üledékek nem fognak gravitációs maximumot okozni) az üledékes medence alatti mélybeli hatásokra, kéreg- vagy köpenybéli inhomogenitásokra utalhatnak (pl. köpeny diapír).

Közép-Európára vonatkozóan a korrigált térképnek geodinamikai szempontból van jelentősége. Az izosztatikus korrekció után visszamaradt regionális jellegű minimumok és az izosztatikus anomáliák összevetéséből a földkéreg mozgásának irányára lehet következtetni. A nem kompenzálható regionális hatások (elsősorban a minimumok) fiatal vagy aktív kéregmozgások hatásának köszönhetők és külön figyelmet érdemelnek.

Köszönetnyilvánítás

A cikk az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben végzett gravitációs módszertani kutatásnak az eredménye, egy előtanulmány. (Az európai adatharmonizálási programok és a geofizikai metaadatbázisok internetes megjelenése (kinga.elgi.hu, www.geomind.eu) során elkészített adatbázis-katalogusok egyik adattáblája az izosztatikus korrekció értéke lehetne, amely szakmai berkekben, az európai léptékű litoszférakutatás és felsőkéreg-kutatás szempontjából egyaránt, érdeklődésre tarthat számot.)

Köszönet minden ismert és ismeretlen kollégának (és a „TÜK”-nek), akik ezeket az adatokat létrehozták, megőrizték, s ezáltal közvetve lehetővé tették, hogy a vizsgálatok elkészüljenek.

Köszönet a geológus kollégáknak, akik nem hagytak nyugton, egyre újabb és pontosabb feldolgozásokat követelve a gravitációs adatfeldolgozástól.

Köszönet továbbá a nemzetközi együttműködéseknek, pl. „West–East Europe Gravity Project” és „CELEBRATION” litoszférakutató program, amelynek köszönhetően a hazai lokális gravitációs képből kitekintve az „európai szintű” gondolkodás lehetővé vált.

Nélkülük valószínűleg ez a cikk nem készült volna el.

¹⁰A domborzat aszimmetriájából származó torzulást a Bouguer-anomália számításánál figyelembe vesszük, így az nem lehet az oka az eltérésnek.

HIVATKOZÁSOK

- ÁDÁM A., BIELIK M. 1998: The crustal and upper-mantle geophysical signature of narrow continental rifts in the Pannonian Basin. *Geophys. J. Int.* **134**, 157–171
- AIRY G. B. 1855: On the compensation of the effect of the attraction of mountain measurements. *Phil. Trans. London*
- BADA G., HORVÁTH F. 1998: A Pannon-medence jelenkori tektonikája, *Természet Világa*, II. különszám, 18–23
- BALKAY B. 1959: Crustal structure below Hungary. *Ann. Univ. Sci. R. Eötvös, Sect. Geol.* **II**, 3–14
- BEHM M., BRÜCKL E., MITTERBAUER U. 2007: New Seismic Model of the Eastern Alps and its Relevans for Geodesy and Geodynamics. *Vermessung & Geoinformation* 2/2007, 121–133
- BIELIK M. 1988: Analysis of the stripped gravity map of the Pannonian Basin. *Geologický Zborník – Geologica Carpathica* **39**, 99–108
- BIELIK M. 1991: Density inhomogeneities of the Earth's crust of the Intra-Carpathian region. *Contr. Geophys. Inst. Slov. Acad. Sci.* **21**, 79–92
- CSAPÓ G. 2008: A magyarországi gravimetriai alaphálózatok vonatkoztatási rendszereinek összehasonlítása. *Magyar Geofizika* **49**, 3, 105–110
- CSONTOS L. 1998: Lemeztektonika másként. *Természet Világa*, II. különszám, 10–17
- DÉREROVÁ J., ZEYEN H., BIELIK M., SALMAN K. 2006: Application of integrated geophysical modeling for determination of the continental lithospheric thermal structure in the Eastern Carpathians. *Tectonics* **25**, TC3009, doi: 10.1029/2005TC001883
- FACSINAY L. 1952: Gravitációs mérések és izosztázia. Akadémiai Kiadó, Budapest
- FACSINAY L., SZILÁRD J. 1956: A Magyar Országos Gravitációs Alaphálózat. *Geofizikai Közlemények* **V**, 2
- GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA honlapja 2006: http://gdr.nrcan.gc.ca/gravity/can2k_iso_e.php
- HORVÁTH F. 2006: Lemeztektonika és az új globális geodinamika. *Magyar Tudomány* **167**, 930–945
- HORVÁTH F. és DOMBRÁDI E. 2008: A Föld mélye a kéregtől a magig. *Földrajzi Közlemények* **132**, 385–400
- HEISKANEN W. A., NISKANEN E., KÁRKI P. 1959: Topographic-isostatic maps for Europe. *Publications of Isostatic Institute*, No. 31., Helsinki
- HEISKANEN W. A. VENING MEINESZ F. A. 1958: The Earth and Its Gravity Field. McGraw Book Company, Inc., London
- JOÓ I. 1992: Recent vertical surface movements in the Carpathian basin. *Tectonophysics* **202**, 120–134
- KISS J. TÓTH Z. 2005: Geofizikai módszertani kutatások: Erőter-geofizikai, képfeldolgozási módszerek (7.1.2.4 téma). Kézirat, ELGI adattár
- KISS J., GULYÁS Á., PRÁCSER E., VÉRTESY L. 2005: Magyarország gravitációs lineamens térképe. VI. Geotudományi Ankét, 2005. november 25., Nagykanizsa
- KISS J. 2006: Gravity Bouguer Anomaly Map of Hungary. *Geophysical Transactions* **45**, 2, 99–10
- KISS J. 2009a: A CEL08 szelvény geofizikai vizsgálata. *Magyar Geofizika* **50**, 2, 59–74
- KISS J. 2009b: Gravitációs és mágneses feldolgozások és modellezések a földtani környezet megismerése céljából. Doktori (PhD) értekezés, NyME Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, Sopron
- KOVÁCSVÖLGYI S., SCHÖNVISZKY L., 1994: A Bükk-hegység és előterének gravitációs értelmezése, Sárospatak – A Magyarhoni Földtani Társulat és a Magyar Geofizikusok Egyesületének Vándorgyűlése, Sárospatak
- MERÉNYI L. 2009: szóbeli közlés (ELGI–GETECH együttműködés)
- MESKÓ A. 1983: Regional Bouguer gravity maps of Hungary. *Acta Geod. Geoph. Mont. Hungary* **18**, 1–2, 187–200
- MESKÓ A. 1989: Bevezetés a geofizikába. Tankönyvkiadó, Budapest
- NEMESI L., DUDÁS J., DRASKOVITS P., HOBOT J., VARGA P.-NÉ, TÓTH CS., KOVÁCSVÖLGYI S., MILÁNKOVICH A., PÁPA A., STOMFAI R., VARGA G. 1994: A Kisalföld geofizikai kutatási eredményeinek összefoglalása. *Geophysical Transactions*, **39**, 2–3
- PARKER R. L. 1973: The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal* **31**, 447
- POPESCU M. N., LAZARESCU V. 1988: Recent vertical crustal movements in Romania: spatial and temporal variations. *Journal of Geodynamics* **9**, 187–197
- POSGAY K., ALBU I., MAYERKOVA M., NAKLADALOVA Z., IBRMAIER I., BLIZKOVSKY M., ARIC K., GUTDEUTSCH R. 1991: Contour map of the Mohorovičić discontinuity beneath Central-Europe. *Geophysical Transactions* **36**, 1, 7–13
- POSGAY K., BODOKY T., HEGEDŰS E. 2003: Seismic Lithosphere and Asthenosphere Investigations in Hungary, In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, edited by LEE W. H. K., KANAMORI H., JENNINGS P. C., KISSLINGER C., Supplement to Chapter 60, Vol. 2, Part B, Chapter 79.26/8, Handbook CD, Academic Press, London
- PRATT J. H. 1855: On the attraction of the Himalaya Mountains and of the elevated regions beyond them upon the plumbline in India. *Phil. Trans. London*
- RENNER J., STEGENA L. 1965: Gravity research of the deep structure of Hungary. *Ann. Univ. Sci.*, Budapest, **VIII**, 153–159
- SCHIEFFER V., KÁNTÁS K. 1949: A Dunántúl regionális geofizikája. *Földtani Közöny*, Budapest
- SCHIEFFER V. 1952: Az izosztatikus anomáliák és a hegységképződési vergenciák összefüggése. *MTA Műszaki Tudományok Osztálya Közleményei* **VII**, 4
- SIMPSON R. W. et al. 1985: A new isostatic residual gravity map of the conterminus United States. Abstract, SEG 55, Annual Meeting
- SIMPSON R. W., JACHENS R. C., BLAKELY R. J. 1983: Airyroot: a Fortran program for calculating the gravitational attraction of an airy isostatic root out to 166.7 km. *USGS Open-File Report* 83-883
- SZABÓ Z. 1989: Filtered gravity anomaly map of Hungary. *Geophysical Transactions* **35**, 1–2, 135–142
- SZAFIÁN P. 1999: Gravity and tectonics: A case study in the Pannonian basin and the surrounding mountain belt. PhD, Vrije Universiteit, Amsterdam, ISBN 90-9012373-3: 153 pp.
- VÖLGYESI L. 2002: Geofizika. Műgyetem Kiadó, Budapest
- WEBRING M. W. 1985: SAKI – A Fortran program for generalized linear inversion of gravity and magnetic profiles. *U.S. Geological Survey Open-File, Report* 85-122, 104 p.
- ZEYEN H., DÉREROVÁ J., BIELIK M. 2002: Determination of the continental lithosphere thermal structure in the western Carpathians: Integrated modeling of surface heat flow, gravity anomalies and topography. *Phys. Earth Planet. Inter.* **134**, 89–104